

MONTAJE Y EVALUACIÓN EN LABORATORIO DE UN SISTEMA PROTOTIPO  
DE PICO-GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA CON UNA TURBINA MICHELL -  
BANKI

PROYECTO DE GRADO

ENRIQUE LLANO VELASQUEZ  
COD: 200719402012

ASESORA:  
CAROLINA MIRA HERNÁNDEZ

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
UNIVERSIDAD EAFIT  
MEDELLÍN  
2012



## CONTENIDO

CONTENIDO .....	3
LISTA DE FIGURAS .....	6
LISTA DE TABLAS .....	8
1 INTRODUCCIÓN.....	9
2 ASPECTOS GENERALES .....	11
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
2.2 ANTECEDENTES .....	11
2.3 JUSTIFICACIÓN .....	12
2.4 OBJETIVOS .....	13
2.5 GENERAL .....	13
2.6 ESPECIFICOS .....	13
3 ESTADO DEL ARTE .....	14
3.1 TURBINA MICHELL – BANKI.....	14
3.1.1 Funcionamiento de la turbina Michell-Banki .....	14
3.1.2 Características de operación de la turbina Michell – Banki .....	17
3.2 LA TURBINA MICHELL-BANKI EN COLOMBIA .....	17
3.3 SISTEMA DE GENERACION.....	18
3.4 CARACTERÍSTICAS DEL PROTOTIPO DE TURBINA A UTILIZAR .....	19
4 ESTADO DEL PROTOTIPO Y PUNTOS DE MEJORA.....	23
5 DISEÑO DEL NUEVO PROTOTIPO DE TURBINA MICHELL BANKI. ....	31
5.1 CÁLCULOS HIDRÁULICOS.....	31
5.1.1 Definición del tamaño de la turbina .....	31
5.1.2 Diagrama de velocidades .....	33
5.2 CÁLCULOS MECÁNICOS .....	35

5.2.1 Fuerzas actuantes sobre el álabe y resistencia mecánica .....	35
5.2.2 Diámetro del eje .....	37
5.3 DETALLES DEL DISEÑO .....	39
5.3.1 Carcasa: .....	39
5.3.2 Chasis: .....	40
5.3.3 Rodete: .....	40
5.3.4 Plataforma de anclaje: .....	40
5.3.5 Álabes. ....	41
5.3.6 Álabe directriz : .....	41
6 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO DE LA TURBINA ....	43
6.1 TORNILLOS .....	43
6.2 GEOMETRÍA DE LA CARCASA .....	44
6.3 UBICACIÓN DE LOS RODAMIENTOS O CHUMACERAS.....	45
6.4 CAMBIO DE CHASIS. ....	46
6.5 CAMBIO DEL DIÁMETRO DEL RODETE.....	47
6.6 DIMENSIONES DEL INYECTOR.....	49
6.7 TAMANO DEL ÁLABE DIRECTRIZ Y CAMBIO DE MATERIAL .....	49
6.8 CAMBIO DE MATERIAL DE LOS ALABES DEL RODETE Y MEJORA DEL ENSAMBLE DE LOS ALABES .....	50
6.9 DISMINUCIÓN DIÁMETRO DE EJE DEL RODETE. ....	51
6.10 FORMA DE ENSAMBLAJE EJE ÁLABE DIRECTRIZ, ÁLABE DIRECTRIZ E INYECTOR .....	51
6.11 TOPE EN EL INYECTOR PARA EL ALABE DIRECTRIZ .....	52
7 SELECCIÓN UN GENERADOR ELÉCTRICO PARA EL SISTEMA PROTOTIPO DE PICO-GENERACIÓN .....	54

7.1	CÁLCULO DE LA CAPACITANCIA PARA LA EXITACION .....	55
7.2	CÁLCULOS DE TRANSMISIÓN .....	56
8	MONTAJES PARA PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA PROTOTIPO DE PICO-GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA. ....	58
8.1.1	Procedimiento para pruebas experimentales .....	61
9	RESULTADOS PRUEBAS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA PROTOTIPO DE PICOGENERACIÓN HIDROELÉCTRICA.....	64
10	CONCLUSIONES.....	69
11	RECOMENDACIONES. ....	71
12	BIBLIOGRAFIA.....	72
13	ANEXOS .....	73

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Turbina Michell - Banki en funcionamiento	14
Figura 2 Componentes de una turbina Michell – Banki.	15
Figura 3 Tipos de entrada del agua	16
Figura 4 Turbinas Michell - Banki instaladas en Colombia	18
Figura 5 Generadores eléctricos de 1.5kW	19
Figura 6 Partes del prototipo a utilizar	20
Figura 7 Curvas de eficiencia turbina Michell Banki Peláez.	21
Figura 8 Curvas de potencia turbina Michell Banki Peláez	22
Figura 9 Prototipo anterior turbina Michell Banki	23
Figura 10 Propuesta de mejoras a realizar	25
Figura 11 Diseño de la turbina	32
Figura 12 Diagrama de velocidades	33
Figura 13 Esfuerzos actuando sobre álabe SOLIDWORKS 2011	36
Figura 14 Diseño de la carcasa	39
Figura 15 Diseño de chasis	40
Figura 16 Diseño del rodete	40
Figura 17 Plataforma de anclaje	41
Figura 18 Diseño de álabes	41
Figura 19 Diseño álabe directriz	42
Figura 20 Cambio por tornillos inoxidables de para toda la turbina	43
Figura 21 Geometría de la Carcasa.	44
Figura 22 Desarrollo para la carcasa	45
Figura 23 Mejora de la Carcasa.	45
Figura 24 Cambio de ubicación de Rodamientos	46
Figura 25 Cambio de chasis.	47
Figura 26 Dimensión del Rodete	48
Figura 27 Cambio diámetro del rodete	48

Figura 28 Mejoras realizadas en las Dimensiones del inyector	49
Figura 29 Cambio de material y dimensiones del álabe directriz	50
Figura 30 Mejora en el ensamble de los álabes	51
Figura 31 Mejora forma de ensamblaje sistema inyector.	52
Figura 32 Mejora tope en el alabe directriz.	53
Figura 33 Vista de la turbina después de las mejoras.	53
Figura 34 Motor eléctrico usado como generador	54
Figura 35 Esquema de conexión capacitancia	55
Figura 36 Sistema de transmisión	57
Figura 37 Acople para la manguera en el anillo hidráulico	58
Figura 38 Sistema de pico generación acoplado al anillo hidráulico	59
Figura 39 Panel de bombillos	60
Figura 40 Etapas de las pruebas	60
Figura 41 Esquema del montaje para las pruebas	60
Figura 42 serie de 2 bombillos	62
Figura 43 serie de 4 bombillos	63
Figura 44 serie de 6 bombillos	63
Figura 45 serie de 8 bombillos	63
Figura 46 Velocidad de rotación sin carga vs caudal	64
Figura 47 Cabeza hidráulica vs caudal	65
Figura 48 Voltaje vs Corriente (capacitancia 25uF)	65
Figura 49 Frecuencia vs Velocidad de rotación (capacitancia 25uF)	66
Figura 50 Potencia vs voltaje (capacitancia 25uF)	67
Figura 51 Eficiencia global vs voltaje (capacitancia 25uF)	67
Figura 52 Forma de la onda generada	68
Figura 53 Frecuencia vs corriente (capacitancia 25uF)	68

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Datos técnicos del motor utilizado como generador	55



## 1 INTRODUCCIÓN

Una turbina Michell-Banki es una máquina hidráulica que se usa para generación hidroeléctrica a través de un flujo transversal de agua. Este tipo de máquina presenta un diseño sencillo y de fácil construcción, lo cual es favorable para aprovechamientos a pequeña escala. Aunque este tipo de turbina es conocido por ser pequeña, hoy en día existen instalaciones de turbinas Michell-Banki de hasta 6 MW.

Dentro de las características más destacadas se encuentra la velocidad de giro, la cual puede ser variada en un amplio rango. El diámetro del rodete no depende estrictamente del caudal ya que se alcanza un aceptable nivel de rendimiento con pequeños caudales. Se puede regular el caudal y la potencia por medio de un álabe ajustable.

La turbina consta de dos elementos principales: un inyector y un rotor. El agua es restituida mediante una descarga a presión atmosférica. El rotor está compuesto por dos discos paralelos a los cuales van unidos los álabes curvados en forma de sector circular.

En la Universidad EAFIT, durante los últimos semestres, se ha venido desarrollando el proyecto de diseño y construcción de una turbina hidráulica para la generación de energía en zonas rurales. En el 2010 realizó un proyecto de grado en el que se construyó un prototipo de una turbina Michell – Banki, sin embargo quedó pendiente la evaluación de desempeño del mismo. En el 2011 se desarrolló un segundo proyecto de grado, en el cual se adecuó el prototipo para realización de pruebas y se estudió experimentalmente el desempeño del mismo. En los ensayos el prototipo de turbina obtuvo buenos resultados aunque el rango de caudal para las pruebas fue limitado por condiciones de infraestructura presentes en la universidad para ese momento.

Durante el proyecto se construyó un prototipo de turbina Michell - Banki, y se acopló a un motor que se usó como generador eléctrico, donde se evaluó el desempeño del sistema de generación de energía hidroeléctrica. Los trabajos anteriores se tienen como referencia para tener un proyecto sólido y aportar a la meta de tener un producto de manufactura sencilla para uso en ambientes rurales.

## 2 ASPECTOS GENERALES

### 2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A pesar que el cubrimiento por parte de las empresas que suministran energía es amplio, aún hay locaciones o lugares remotos en los cuales no hay conexión a la red eléctrica nacional. Sin embargo, en estos lugares hay recursos naturales propios como quebradas, riachuelo o ríos de los cuales se puede aprovechar el flujo de agua para la generación y suministro de energía eléctrica.

Buscando oportunidades de explotar los recursos naturales de una manera ecológica la universidad EAFIT ha venido trabajando en el desarrollo de una turbina Michell Banki para uso en ambientes rurales. En el presente proyecto se pretende hacer un aporte en este proceso, para poder obtener un sistema prototipo de generación eléctrica acoplando un generador eléctrico a la turbina Michell Banki, además realizar reformas para obtener en un futuro, un producto de fácil ensamblaje y manufactura, que pueda ser asequible para personas que vivan en zonas rurales.

### 2.2 ANTECEDENTES

En el semestre 2011-1 dos estudiantes de ingeniería mecánica de la universidad Universidad EAFIT empezaron el proyecto de crear y diseñar un turbina Michell-Banki, los objetivos del proyecto consistían en identificar el principio de funcionamiento de la turbina Michell-Banki, reconocer la importancia de esta turbina para las necesidades energéticas de las zonas no interconectadas en Colombia, emplear un modelo de cálculo para establecer los parámetros teóricos de funcionamiento de un prototipo de turbina Michell-Banki, diseñar y construir un prototipo de turbina funcional y de fácil reparación e inspeccionar el prototipo mediante unas pruebas de operación básicas. (Guerrero & Tapias, 2011).s

Ya que el alcance de este proyecto se vio limitado por el tiempo para hacerle sus respectivos ensayos, se propuso un nuevo proyecto de grado el cual fue liderado por otro estudiante de ingeniería mecánica en el segundo semestre del 2011. Este proyecto se encargó de diseñar e implementar modificaciones necesarias para un banco de pruebas en el laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT. En este proyecto se presentaron algunas dificultades para realizar las pruebas por limitaciones de bombeo en cuanto a caudal. (Pelaez, 2012)

De estos esfuerzos anteriores surge el presente proyecto el cual tiene por objetivo principal adecuar un generador al montaje anterior para tener un sistema prototipo de generación hidroeléctrica. Además, se requiere realizar algunas mejoras y adecuaciones, seleccionar un generador eléctrico adecuado para la bomba existente, acoplar todos los componentes y realizar los ensayos pertinentes con todas las mejoras implementadas.

## 2.3 JUSTIFICACIÓN

Las turbinas Michell-Banki son una solución viable para surtir un servicio básico de energía eléctrica, este proyecto tiene una gran importancia en cuanto al impacto ecológico, económico y práctico. Equipos como este para el aprovechamiento de la energía hidráulica tienen alta aplicabilidad para la generación energía en las zonas rurales donde haya disponibilidad del recurso hídrico y ayudando a la autosuficiencia energética.

El desarrollo del proyecto es valioso y pertinente. El cumplimiento de los requisitos y la valoración experimental del desempeño del sistema de generación es un aporte en el camino para llevar ésta tecnología a otro nivel, donde se pueda brindar soluciones confiables a la población rural y a la vez poder contribuir en el avance de las energías alternativas.

El desarrollo del proyecto requiere de habilidades y conocimientos propios de la Ingeniería Mecánica como el diseño de máquinas junto con el manejo de programas para ingeniería CAD, que son necesarios para las hacer modificaciones que realmente ayuden al mejoramiento de la turbina. La mecánica de fluidos es fundamental en este proyecto ya que se debe tener conocimiento sobre este tema para interpretar datos y variables presentes en el fenómeno. Además, se requieren conocimientos básicos de otras ciencias como resistencia de materiales, física del movimiento, entre otras; que aportan al desarrollo del proyecto.

## 2.4 OBJETIVOS

## 2.5 GENERAL

Evaluar en laboratorio un sistema prototipo de picogeneración hidroeléctrico con una turbina Michell – Banki.

## 2.6 ESPECIFICOS

- Reconocer el estado del prototipo de turbina Michell Banki existente en la universidad EAFIT, he identificar puntos de mejora y adecuaciones requeridas para la utilización del prototipo en un sistema de pico-generación hidroeléctrica.
- Implementar las mejoras y adecuaciones propuestas en el objetivo anterior.
- Seleccionar un generador eléctrico para el sistema de pico-generación (menor a 10 kW), que se ajuste a las características del prototipo de turbina.
- Realizar los montajes requeridos para ensayar el sistema prototipo de pico-generación hidroeléctrico.
- Hacer pruebas de operación para evaluar el desempeño del sistema prototipo.de pico-generación hidroeléctrica

### 3 ESTADO DEL ARTE

#### 3.1 TURBINA MICHELL – BANKI

A G. Michell, ingeniero australiano fue el creador. Posteriormente esta turbina fue comercializada en forma extensa por la empresa alemana Ossberger Turbinen Fabrik que se asoció a Michell en el año de 1923. En los últimos 65 años esta empresa fue responsable por la venta de más de 7.000 unidades en todo el mundo. Actualmente, el número de fabricantes de este tipo de turbina supera los cien, un ejemplo del funcionamiento se muestra en la Figura 1 (CERPCH). La turbina es de flujo transversal con descarga atmosférica y el eje donde entrega toda su potencia mecánica está dispuesto horizontalmente.

Figura 1 Turbina Michell - Banki en funcionamiento



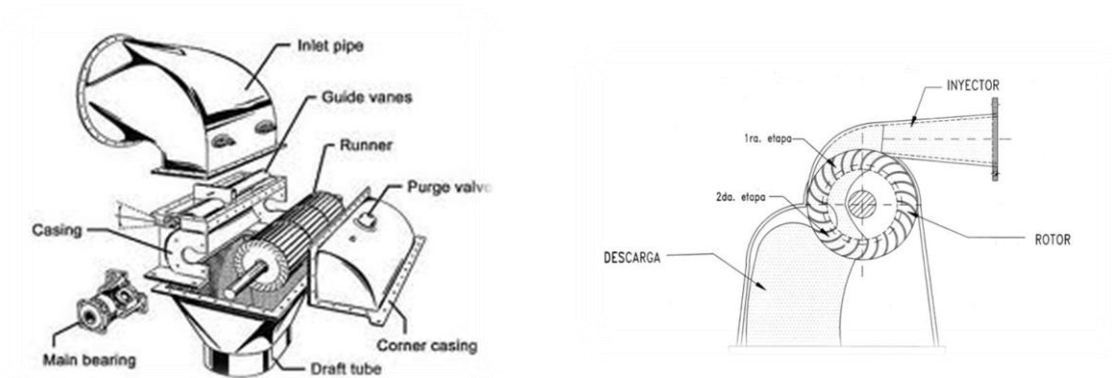
(CERPCH)

##### 3.1.1 Funcionamiento de la turbina Michell-Banki

El funcionamiento de la turbina es sencillo. El agua entra a través de una tubería que la canaliza hasta llegar a la pala directriz móvil, o distribuidor, regulando la cantidad de fluido que penetra en el interior, según las revoluciones del eje, habilitando una entrada mayor o menor. La pala directriz se encarga, además, de

direccionar el flujo para que el agua golpee contra los álabes propiciand así el giro del rodete. Una vez atravesados estos álabes, el fluido continúa su camino en el interior y reincide sobre los álabes inferiores, ayudando al giro.

Figura 2 Componentes de una turbina Michell – Banki.



(Soluciones Prácticas)

El rodete consta de dos o más discos paralelos, entre los que se montan, cerca del borde, unas láminas curvadas que son los álabes. La construcción del rodete con secciones de tubería comercial es factible, aunque es difícil garantizar la estabilidad dimensional.

Un aspecto muy atractivo derivado de la constitución de la máquina y su forma de funcionamiento consiste en que el follaje, hierbas, lodos, entre otros; que durante la entrada del agua se quedan entre los álabes, vuelven a ser expulsados después de medio giro del rodete con el agua de salida por el efecto de la fuerza centrífuga. De este modo el rodete tiene un funcionamiento poco sensible a elementos no deseados, que es una de las ventajas que posee respecto a otras turbinas.

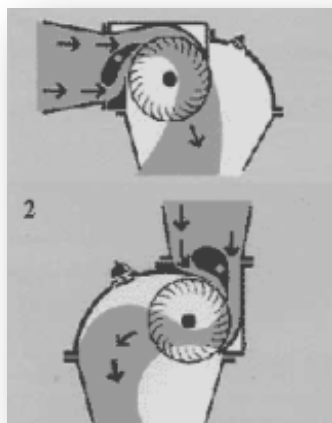
Los rodamientos de las turbinas son de tipo rodillo. Es importante que al diseñar la carcasa se tenga muy en cuenta el aspecto de hermeticidad en los rodamientos respecto al paso del agua. Por ello la carcasa está preparada con alojamientos y

un sistema de prensaestopas que evita las fugas de forma eficiente. Excepto el engrase, los cojinetes no requieren ningún trabajo de conservación.

El elemento principal, el rodete, consta de un par (o más) discos en los que se adhieren los álabes, que son de curvatura lineal. Tanto el rodete como el ingreso de agua se pueden fabricar con láminas de acero requiriendo herramientas y técnicas de armado simples, por lo que su construcción se puede realizar en talleres de mecánica básica.

La forma de instalación puede adoptar dos disposiciones: Entrada horizontal de agua o entrada vertical del agua.

Figura 3 Tipos de entrada del agua



(Comité Ejecutivo de Desarrollo e Innovación Tecnológica)

La turbina de flujo transversal o Michell-Banki es una máquina utilizada principalmente para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. Sus ventajas principales están en su sencillo diseño y su fácil construcción lo que la hace atractiva en el balance económico de un aprovechamiento a pequeña escala. No obstante esto no impide que la turbina se utilice en grandes instalaciones. Aunque la turbina de flujo transversal se conoce como una máquina de pequeña escala, existen actualmente máquinas de este tipo de hasta 6 MW.



(Marchegiani)

### 3.1.2 Características de operación de la turbina Michell – Banki

La Michell-Banki posee una curva de rendimiento especial que tiene forma aplanada. Esto se obtiene mediante un diseño de admisión parcial. Es decir, si se divide el rotor en 3 partes iguales y la admisión del agua se puede realizar por 1/3, 2/3 o la totalidad del rodete.

Se puede detallar que la turbina Michell Banki mantiene un rendimiento constante incluso con bajos caudales, cosa que no pasa con otras turbinas. La turbina de flujo transversal es apropiada para donde no se garantiza un caudal constante de agua, en especial ríos pequeños. Algunos ríos durante ciertos meses de año mantienen poco caudal de agua, razón por la cual se debe considerar en el diseño un caudal mínimo que será parcial y para momentos de alto flujo de agua, se puede considerar el caudal total para mayor generación. (The Schumacher Centre for Technology & Development, 2005).

## 3.2 LA TURBINA MICHELL-BANKI EN COLOMBIA

En Colombia, la turbina hidráulica Michell-Banki ha sido utilizada en pocas ocasiones mini centrales hidroeléctricas, lo que permite afirmar que es poco conocida. Se estima que dicha turbina puede jugar un papel decisivo en proyectos hidroeléctricos pequeños, dado su menor impacto ambiental. Esta tecnología se implementó en Colombia en 1958 con una turbina fabricada por Ossberger y con una potencia de 15.3 kW. Se han encontrado algunos proyectos de mini, micro y pico centrales que utilizan la turbina Michell Banki en el país ver Figura 4

Figura 4 Turbinas Michell - Banki instaladas en Colombia

Central	Localización	# / Marca	kW	Año
Parroquia Palermo	Palermo, Boyacá	1 Ossberger <sup>a</sup>	15.3	1958
Inza	Inza, Cauca	1 Ossberger <sup>a</sup>	58.9	1963
Plantación Mirapalm	Tumaco, Nariño	1 Ossberger <sup>a</sup>	40.6	1973
Paucedonia	Sierra Nevada, Magdalena	1 Colturbinas <sup>b</sup>	16	1989
Siervo Arias	Sierra Nevada, Magdalena	1 Colturbinas <sup>b</sup>	13	1989
Machosolo	Sierra Nevada, Magdalena	1 Colturbinas <sup>b</sup>	14	1991
La Tagua	La Tagua, Magdalena	1 Colturbinas <sup>c</sup>	10	1991
Caracolí	Caracolí, Guajira	1 Colturbinas <sup>b</sup>	60	1994
López de Micay	López de Micay, Cauca	2 Italianas <sup>d</sup>	300	1995
López de Micay	López de Micay, Cauca	2 Colturbinas <sup>c</sup>	300	1995
La Reforma - Emcali	Cali, Valle	1 Ossberger <sup>a</sup>	169	1996
Alcaldía de San Juan	Caracolí, Guajira	1 Colturbinas <sup>c</sup>	30	2000
Guacamayas	San Vicente del Caguán, Caquetá	1 Alfa I. M. <sup>f</sup>	5	2002
La Uribe	La Uribe, Meta	1 Alfa I.M. <sup>f</sup>	3	2003
Bahía Cupica	Bahía Cupica, Chocó	1 Colturbinas <sup>c</sup>	327	2004
Hacienda Pajonales S.A.	Departamento del Tolima	1 Aprotect <sup>g</sup>	20	Sin dato
Termas de Santa Rosa	Santa Rosa, Risaralda	1 Aprotect <sup>g</sup>	50	2005
Puerto Amor	San Vicente del Caguán, Caquetá	1 Alfa I.M. <sup>f</sup>	3	2005
Vereda Las Juntas	Litoral Pacifico Vallecaucano	1 Aprotect <sup>g</sup>	30	Sin dato
Refugio del Cisne	Parque Natural de los Nevados	1 Aprotect <sup>g</sup>	7.5	Sin dato
El Molino	Resguardo Indígena Paez de Lame	1 Aprotect <sup>g</sup>	10	2000
San Francisco	Resguardo Indígena Paez de San José	1 Aprotect <sup>g</sup>	25	2005

*a (Ossberger, Sin fecha); b (Núñez, 1993); c (Colturbinas, 2007); d (Silva, 2008); e (Slogsnat et al., 1996); f (Alfa I.M., 2002); g (Aprotect, 2005)*

(Universidad Nacional)

### 3.3 SISTEMA DE GENERACION

Consiste en el acoplamiento de turbina-generador, el cual aprovecha la energía potencial del agua por diferencias de altura para mover un rodete sujeto a un eje. El eje se acopla a un generador eléctrico por medio de un sistema de transmisión. Este tipo de generadores pueden ser corriente alterna o corriente directa dependiendo de las necesidades del usuario.

Un generador eléctrico transforma energía mecánica en energía eléctrica basándose en la ley de Faraday. La acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos del estator, es la responsable de la transformación.

En el mercado es posible conseguir generadores de bajas potencia que son usados en plantas electro generadoras por combustibles derivados del petróleo.

También, se usan motores asíncronos como generadores, los cuales requieren de un sistema de excitación mediante capacitores.

En la en la Figura 5, se muestran dos generadores eléctricos comerciales monofásicos de 1.5kW.

Figura 5 Generadores eléctricos de 1.5kW



(Meilan)

### 3.4 CARACTERÍSTICAS DEL PROTOTIPO DE TURBINA A UTILIZAR

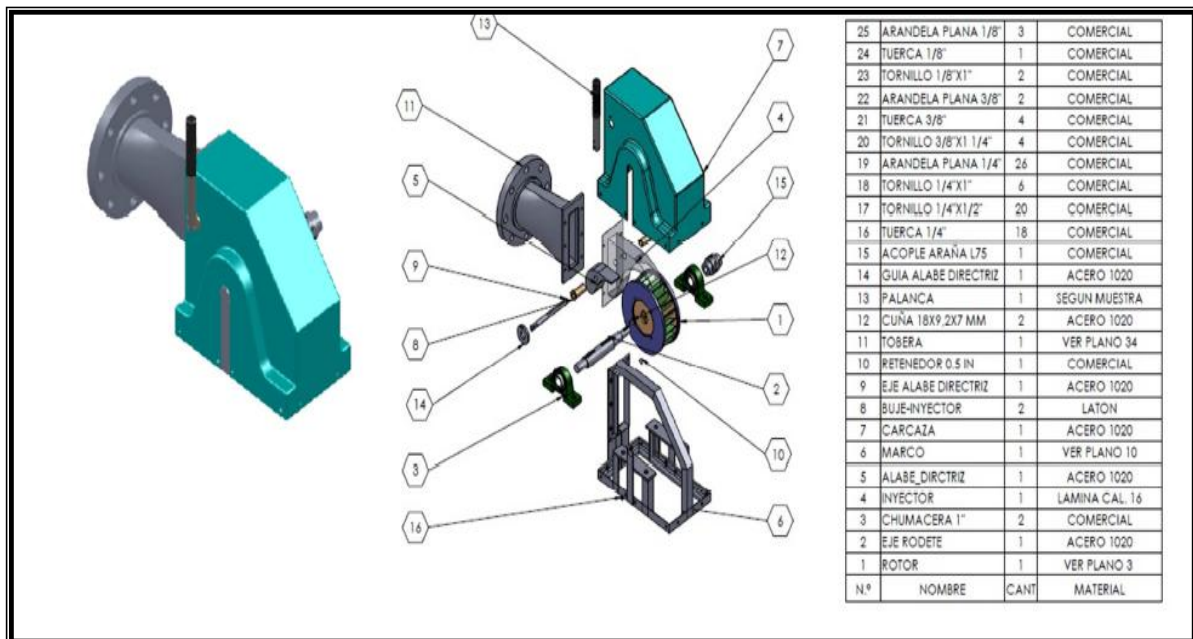
La universidad EAFIT ha venido desarrollando un proyecto para evaluar que viabilidad tiene la idea de construir en serie una turbina Michell Banki para picogeneración. En el semestre 2010-2, dos estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad EAFIT comenzaron con el proyecto de crear y diseñar una turbina Michell Banki, donde los objetivos fundamentales de este proyecto eran: Identificar el principio de funcionamiento de la turbina Michell-Banki, reconocer la importancia de esta turbina para las necesidades energéticas de las zonas no interconectadas en Colombia, emplear un modelo de cálculo para establecer los parámetros teóricos de funcionamiento de un prototipo de turbina Michell-Banki, diseñar y construir un prototipo de turbina que sea funcional y de fácil reparación. Inspeccionar el prototipo mediante unas pruebas de operación básicas y concluir los principales logros (Guerrero & Tapias, 2011).

La turbina construida tenía las siguientes características (Guerrero & Tapias, 2011):

- Diámetro interno del rodete (122,6 mm)
- Radio de curvatura de los álabes ( 38,1 mm)
- Ángulo de curvatura de álabes (73.82 °)
- Primera aproximación ancho del rodete (60 mm)
- Arco máximo de admisión ( $\leq 120.6^\circ$ )
- Máximo porcentaje de admisión (0.335)
- Diámetro máximo del eje que atraviesa el motor (61,3 mm)

La modelación y las partes del prototipo de turbina obtenido se muestran en la siguiente figura.

Figura 6 Partes del prototipo a utilizar

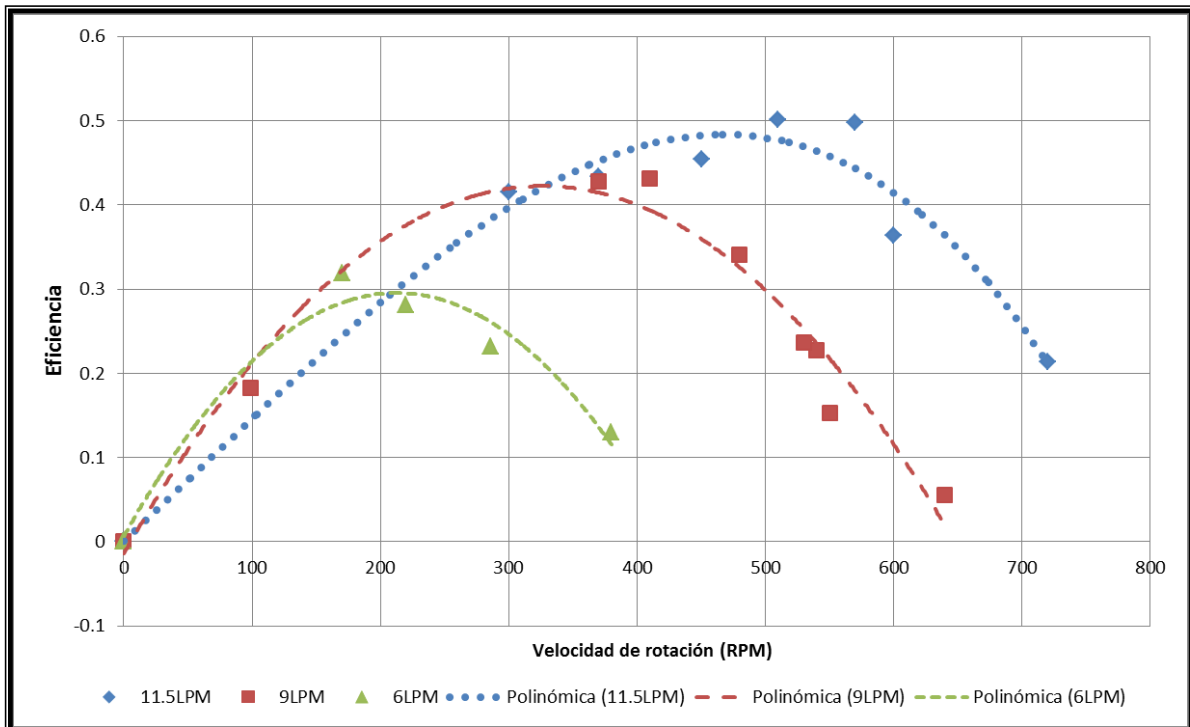


(Guerrero & Tapias, 2011)

En segundo semestre de 2011 se desarrolló otro proyecto de grado liderado por el estudiante de Ingeniería Mecánica Juan Diego Peláez Restrepo. Este proyecto se encargó de diseñar e implementar modificaciones necesarias para un banco de

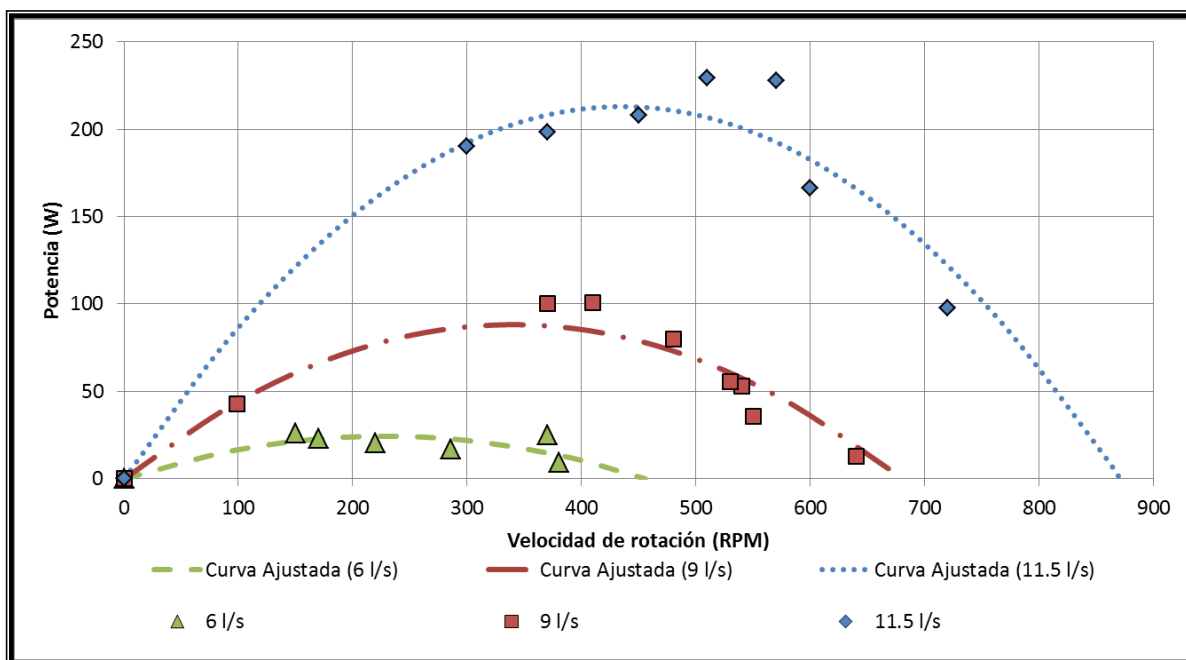
pruebas en el laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT. Las pruebas ejecutadas permitieron construir las curvas de desempeño que se muestran en las siguientes figuras. El caudal utilizado en los ensayos fue de 11.5 LPS. La máxima potencia entregada fue de 229.24 W con una eficiencia de 50.1% con el caudal de 11.5 LPS. (Pelaez, 2012)

Figura 7 Curvas de eficiencia turbina Michell Banki Peláez.



(Pelaez, 2012)

Figura 8 Curvas de potencia turbina Michell Banki Peláez



(Pelaez, 2012)

#### 4 ESTADO DEL PROTOTIPO Y PUNTOS DE MEJORA

En esta sección se hace un reconocimiento del estado del prototipo de turbina Michell Banki existente en la universidad EAFIT, se identifican puntos de mejora y adecuaciones requeridas para la utilización del prototipo en un sistema de pico-generación hidroeléctrica. En primer lugar se desmontó la turbina del arreglo para pruebas en el laboratorio hidráulica, que fue usado en el proyecto de grado anterior.

Figura 9 Prototipo anterior turbina Michell Banki



En este proceso se pudo apreciar la desigualdad en los tornillos, como también la carencia de un acabado anticorrosivo siendo muy importante ya que estos elementos de sujeción están sometidos a permanente humedad. Otro aspecto a

tener en cuenta es la calidad del sello o empaque entre la tobera y el inyector no se pudo apreciar muy bien la calidad del sello pues para esto era necesario observarla en funcionamiento, pero aparentemente se veía funcional aunque se puede mejorar al implementar menos interfaces entre ambas partes, suprimiendo así que cierta parte de la carcasa esté involucrada en este ensamble.


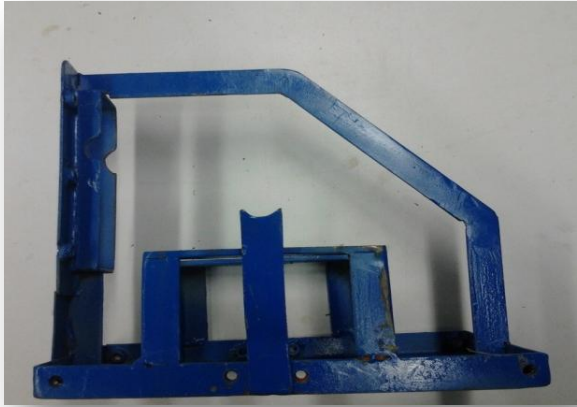
El desensamble de la máquina fue sencillo ya que no hay que tener en cuenta la alineación de las piezas y simplemente es separar las partes pero en caso contrario es evidente el grado de complejidad al que se enfrenta cuando se quiere volver a ensamblar la turbina, por esta razón se hicieron algunos cambios a la carcasa de ésta, para tener así un ensamblaje más cómodo y que personal con un manual básico y con la mínima variedad de herramientas pueda armar su turbina fácilmente. Uno de los problemas que se detectó y no tiene que ver con el ensamble de la turbina es la disposición de los rodamientos en este caso chumaceras, ya que se encuentran dentro de la carcasa, teniendo contacto directo con el flujo de agua, haciendo aún más frecuente el desarme para mantenimiento o incluso, el remplazo de estas piezas. Por esto, se pensó en reubicar las chumaceras fuera de la carcasa para que fuese de fácil mantenimiento o en el caso de necesitar hacer un cambio, la complejidad sea menor.



De los componentes más difíciles de ensamblar era, el eje del álabe directriz, el álabe directriz y el inyector. Este era el paso más difícil pues se debía pre ensamblar el inyector con el álabe directriz sin el eje, este sub ensamblaje debía ser ingresado dentro del estrecho espacio de la carcasa, sosteniendo de forma manual las tres partes hasta poder alinear de manera concéntrica los tres agujeros, para finalmente atravesar el eje del alabe directriz, siendo verdaderamente complejo aun para la persona que diseñó este sistema.



Figura 10 Propuesta de mejoras a realizar


MEJORA	DESCRIPCION	IMÁGENES DE CONDICIONES ACTUALES
Tornillos sin protección	<p>Al estar expuesto a humedad se hace necesario este tipo de protección</p>	
Geometría de la carcasa compleja	<p>Simplificar de manera práctica la geometría de la carcasa para facilitar el ensamble de los componentes.</p>	

Ubicación de los rodamientos o chumaceras expuestos a humedad.	Reubicar los rodamientos de manera tal que no tengan contacto con el agua.	
MEJORA	DESCRIPCION	IMÁGENES DE CONDICIONES ACTUALES
Cambio de endochasis a exochasis.	Trasladar la estructura interna del chasis a la parte externa.	

Cambio de la dimensión del rodete.	Disminuir el diámetro del rodete para realizar ensayos con caudales menores.	
Dimensión del tamaño inyector.	Disminuir el tamaño por el cambio de diámetro del rodete.	
<b>MEJORA</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>IMÁGENES DE CONDICIONES ACTUALES</b>

Dimensión del alabe directriz.	Disminuir el tamaño por el cambio de diámetro del rodete.	
Cambio de material alabe directriz	Al estar expuesto a humedad constante se hace necesario el cambio de material.	
Cambio y ensayo de los alabes del rodete de material diferente.	Con el ánimo de probar otros materiales. Y disminución de peso.	
<b>MEJORA</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>IMÁGENES DE CONDICIONES ACTUALES</b>

Mejora del ensamble de los álabes	Cambiar la forma en cómo se ensamblaban los álabes del rodete.	
Disminución diámetro de eje del rodete.	Cambió de la geometría del eje ya que el actual está sobre dimensionado.	
Forma de ensamble eje alabe directriz, álabes directriz e inyector	Junto con la carcasa simplificar la manera en cómo se ensamblan estas tres piezas.	
<b>MEJORA</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>IMÁGENES DE CONDICIONES ACTUALES</b>

<p>Tope en el inyector para el álabe directriz</p>	<p>Crear un tope en el inyector para que el álabe directriz no golpee los alabes del rodete.</p>	
--	--	--

## 5 DISEÑO DEL NUEVO PROTOTIPO DE TURBINA MICHELL BANKI.

Aprovechando las reformas propuestas se decidió construir una nueva turbina para poder trabajar con los rangos de caudal disponibles en el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT, de hasta 16.5 LPS.

### 5.1 CÁLCULOS HIDRÁULICOS

#### 5.1.1 Definición del tamaño de la turbina

De acuerdo con las condiciones que nos ofrece el laboratorio de hidráulica ubicado en el bloque de ingeniería. La turbina se debió diseñar bajo el criterio del rango de caudales que podían generar las bombas hidráulicas, con estos datos se calculó el tamaño del rodete el cual define el resto de las dimensiones de la turbina dando como resultado un rodete de 150 mm. El caudal de trabajo de la turbina es 12 LPS, la potencia de diseño es 650W (0.884 CV) y supone una eficiencia del 85%. Con estos datos es posible encontrar la cabeza hidráulica requerida.

$$H = \frac{P}{\rho g \eta Q}$$

Donde,

$H$  : Cabeza hidráulica [m].

$P$  : Potencia al freno [W].

$\rho$  : Densidad [1000 kg/m<sup>3</sup>].

$g$  : Aceleración de la gravedad [9.81 m/s<sup>2</sup>].

$Q$  : Caudal [m<sup>3</sup>/s].

La cabeza hidráulica es de 6.5m equivalente a 63.7 KPa de presión estática. La velocidad de rotación de la turbina se encuentra como:

$$N = 42,3 \frac{\sqrt{H}}{D_e}$$

Donde,

$D_e$  : Diámetro exterior del rodete [m].

$N$  : Velocidad óptima de giro del rodete [RPM].

La velocidad de rotación de diseño para un  $H=6,5\text{m}$ ,  $Q=12\text{LPS}$  y  $P=650\text{W}=0,884\text{CV}$  de la turbina es 677 RPM. Se calculan los números específicos de revoluciones para verificar que se está en el rango de aplicación de la turbina Michell – Banki ( $N_q=18\text{-}60$ ,  $N_s=60\text{-}200$ ).

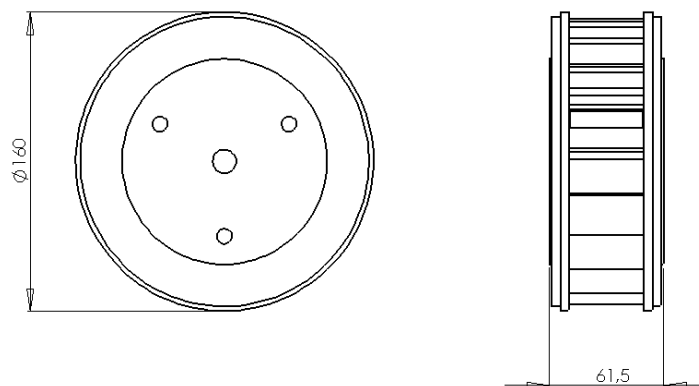
$$N_q = N \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}}$$

$$N_s = N \frac{P^{1/2}}{H^{5/4}}$$

En estas ecuaciones la potencia es en CV (caballos de vapor), La altura en m, el caudal es en  $\text{m}^3/\text{s}$  y la velocidad de giro en RPM. Para el prototipo de turbina:  $N_q=18.2$  y  $N_s=156.5$ .

En la Figura 11 se muestra un esquema del rodete del prototipo de turbina.

Figura 11 Diseño de la turbina

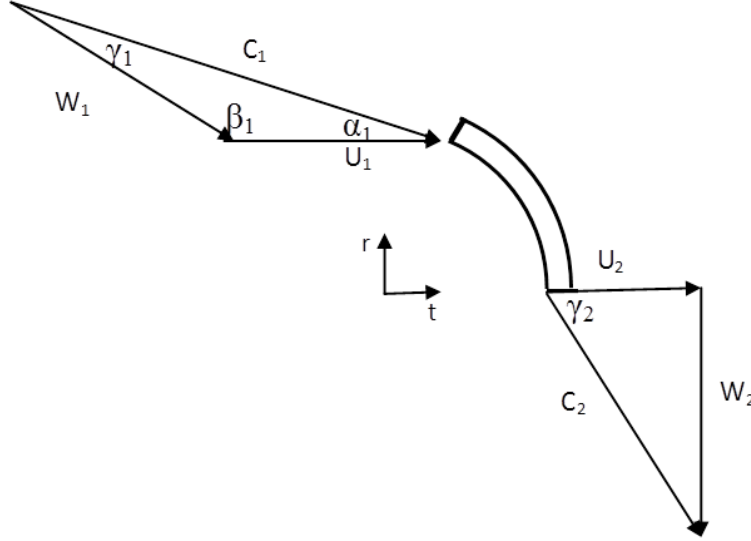




### 5.1.2 Diagrama de velocidades

En la Figura 12 se muestra un esquema de velocidades relativas, absolutas y tangenciales para un álabe.

Figura 12 Diagrama de velocidades



El ángulo  $\alpha_1$  tiene un valor promedio típico de  $16^\circ$ . El ángulo entre la velocidad relativa y la velocidad tangencial se encuentra como:

$$\beta_1 = 180 - \beta'_1$$

Donde,

$$\beta'_1 = \sin^{-1} \left[ \frac{\sin \alpha_1}{\sqrt{(1 - K_u) * (2 - K_u) * \cos^2 \alpha_1}} \right]$$

Con  $K_u=0.5$ ,  $\beta_1 = 150,17^\circ$

La velocidad tangencial se encuentra como:

$$U_1 = \Omega r_1$$

$$U_2 = \Omega r_2$$

Las velocidades relativas a la entrada y la salida se relacionan de la siguiente manera, para garantizar la conservación de masa:

$$W_1 r_1 = W_2 r_2$$

$$W_2 = W_1 \frac{r_1}{r_2}$$

Para el caso del prototipo de turbina:  $r_1 = 0,075\text{m}$  y  $r_2 = 0,050\text{m}$

La velocidad absoluta de entrada se encuentra con la ecuación de descarga.

$$C_1 = \sqrt{2gH}$$

$$C_1 = \sqrt{2 * 9,81 * 6,50}$$

$$C_1 = 11,29 \text{ m/s}$$

La velocidad relativa a la entrada se encuentra como:

$$\frac{C_1}{\sin \beta_1} = \frac{W_1}{\sin \gamma_1}$$

$$W_1 = \frac{\sin \gamma_1}{\sin \beta_1} C_1$$

$$W_1 = 0,554 * C_1$$

$$W_1 = 0,554 * 11,29$$

$$W_1 = 6,26 \text{ m/s}$$

También es posible encontrar la velocidad tangencial:

$$\frac{U_1}{\sin \gamma_1} = \frac{C_1}{\sin \beta_1}$$

$$U_1 = \frac{\sin 13,83}{\sin 150,17} C_1$$

$$U_1 = 0,4886 C_1 = 5,51 \text{ m/s}$$

Con estos datos la velocidad de rotación es:  $\Omega = 73,55 \text{ rad/s} = 702,4 \text{ RPM}$ .

Así es posible encontrar el ángulo formado por la velocidad absoluta y la velocidad relativa a la salida:

$$\gamma_2 = \tan^{-1} \left( \frac{U_2}{W_2} \right)$$

$$\frac{U_2}{W_2} = \frac{\Omega * r_2}{\omega_1 \frac{r_1}{r_2}} = \frac{\Omega * r_2^2}{\omega_1 * r_1} = \frac{(73,55)(0,050)^2}{(6,26 \text{ m/s})(0,075 \text{ m})} = 0,3916$$

$$\gamma_2 = \tan^{-1}(0,3916)$$

$$\gamma_2 = 21.38^\circ$$

Velocidad relativa a la salida:

$$W_2 = W_1 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)$$

$$W_2 = 6.26 \frac{m}{s} \left( \frac{0,075m}{0,050m} \right) = 9.39 \frac{m}{s}$$

Velocidad tangencial a la salida:

$$U_2 = \Omega r_2$$

$$U_2 = \left( 73.55 \frac{rad}{s} \right) (0.050m) = 3.68 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta:

$$C_2 = \sqrt{W_2^2 + U_2^2}$$

$$\sqrt{9.3^2 + 3.68^2} = 10.08 \frac{m}{s}$$

## 5.2 CÁLCULOS MECÁNICOS

### 5.2.1 Fuerzas actuantes sobre el álabe y resistencia mecánica

- Fuerza hidráulica

Número de alabes que reciben el flujo

$$Z_f = \frac{\delta}{360} * 20 = 6 \text{ álaves}$$

Caudal que ingresa a un alabe

$$Q_a = \frac{Q_{max}}{Z_f} = \frac{0,012 \frac{m^3}{s}}{6} = 0,002 \frac{m^3}{s}$$

Fuerza hidráulica en dirección tangencial:

$$F_{hx} = Q_a \rho (c_2 \sin \gamma_2 - c_1 \cos \gamma_1)$$

$$F_{hx} = 0,02 \frac{m^3}{s} * 1000 \frac{kg}{m^3} (10.08 * \text{sen} 20 - 11.29 \frac{m}{s} \cos 16)$$

$$F_{hx} = -14.81N$$

Fuerza hidráulica en dirección radial:

$$F_{hy} = Q_a \rho (-c_2 \cos \gamma_2 + c_1 \sin \gamma_1)$$

$$F_{hy} = 0.002 \frac{m^3}{s} * 1000 \frac{kg}{m^3} (-10.08 * \cos 20 + 11.29 \frac{m}{s} \sin 16)$$

$$F_{hy} = -12.72\text{N}$$

Fuerza hidráulica resultante:

$$F_{hr} = \sqrt{F_{hx}^2 + F_{hy}^2}$$

$$F_{hr} = \sqrt{-14.81^2 + -12.72^2} = 19.52\text{ N}$$

- Fuerza centrífuga

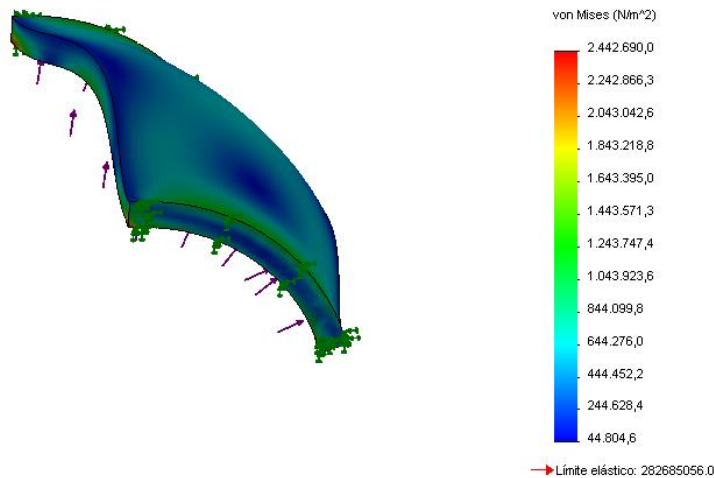
$$F_c = M * \omega^2 * \frac{D}{2}$$

$$F_c = 0.03647 * (73.55 \frac{\text{rad}}{\text{s}})^2 * 0.075\text{m} = 14.79\text{ N}$$

Ecuaciones tomadas de: Manual de diseño y estandarización de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas.

Para evaluar la resistencia mecánica del álabe se hace una simulación con las fuerzas calculadas previamente. Se supone que el álabe está sujeto en los extremos. En la figura se muestran los esfuerzos actuantes sobre el álabe.

Figura 13 Esfuerzos actuando sobre álabe SOLIDWORKS 2011



### 5.2.2 Diámetro del eje

El diámetro del eje del rotor debe tener un valor máximo de tal manera que no obstruya el paso del flujo a través de éste. El diámetro máximo puede calcularse mediante la siguiente relación:

$$d_{e,max} = 0,33De$$

$$d_{e,max} = 0,33 \cdot 0,15m$$

$$d_{e,max} = 0,0495m$$

En cuanto a resistencia mecánica el diámetro del eje debe ser suficiente para soportar los esfuerzos ocasionados por las cargas hidráulicas y por el peso del rodete.

El torque que actúa sobre el eje es:

$$T = \frac{P_t}{\Omega} = \frac{650}{73,55} = 8,8Nm$$

La fuerza tangencial se encuentra como:

$$R_e = \text{radio rodete}$$

$$F_t = \frac{T}{R_e} = \frac{8,83}{0,075} = 117,8N$$

El peso rodete del rodete:

$$P_r = 22,621N$$

El momento flector máximo en dirección x es:

$$M_x = \frac{F_t \cdot a}{2} = \frac{117,8 \cdot 0,04m}{2}$$

$$M_x = 2,36Nm$$

El momento flector máximo en dirección y es:

$$M_y = \frac{P_r \cdot a}{2} = \frac{22,621 \cdot 0,04}{2}$$

$$M_y = 0,45N \cdot m$$

El momento flector máximo resultante sobre el eje es:

$$M_{max} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} = \sqrt{2,36^2 + 0,45^2}$$

$$M_{max} = 2,4N \cdot m$$

De esta manera se encuentra el diámetro mínimo requerido para el eje:

$$d_e^3 = \frac{16}{\pi S_d} \sqrt{(K_m * M_{max})^2 + (K_t * T_{max})^2}$$

$$K_m = 1.5$$

$$K_t = 1$$

El esfuerzo admisible es:

$$S_d = \frac{S_y}{F_s} = \frac{530 \text{ MPa}}{5} = 106 * 10^6 \text{ Pa}$$

Con estos datos se encuentra el diámetro mínimo del eje:

$$d_e^3 = \frac{16}{\pi * 106 * 10^6} * \sqrt{(1,5 * 2,4)^2 + (1 * 8,8)^2}$$

$$d_e = 7,7 \text{ mm}$$

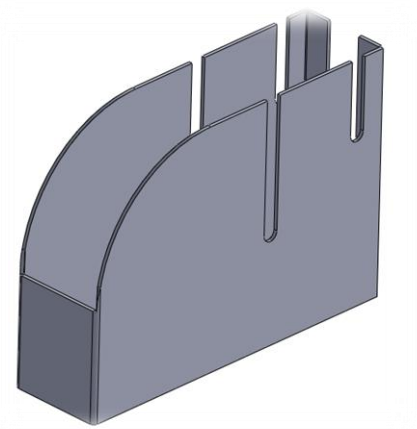
Ecuaciones tomadas de: Manual de diseño y estandarización de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas.

### 5.3 DETALLES DEL DISEÑO

#### 5.3.1 Carcasa:

La idea inicial fue cambiar la carcasa para poder poner los rodamientos fuera del alcance del agua por esto se debió cambiar la forma en cómo los diferentes componentes se ensamblaban. En el diseño antiguo los componentes se pre ensamblaban al chasis y luego de esto la carcasa era puesta encima tapando todos los componentes incluyendo los rodamientos y solo dejando un pequeño agujero para dejar expuesto el voladizo del eje. En el nuevo diseño, al usar la carcasa como chasis, los componentes son pre ensamblados para mayor practicidad e ingresados por la parte superior. De esta manera, la base o chasis se puede anclar en el lugar donde se instalará finalmente y en este lugar se pueden acoplar todos los componentes con solo unas pocas herramientas. Además, la carcasa posee unas pequeñas tapas las cuales se pueden retirar fácilmente para futuras reparaciones. Aunque estos detalles son importantes el hecho de que los rodamientos se encuentren en el exterior y lejos de la humedad soluciona muchos problemas, facilitando el mantenimiento y remplazo de estas piezas que son las de más desgaste y que requieren de manutención por parte del encargado.

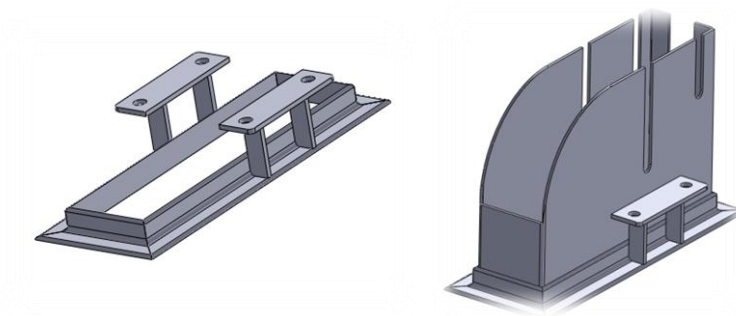
Figura 14 Diseño de la carcasa



### 5.3.2 Chasis:

El chasis fue otro punto en el cual se quiso integrar a la carcasa de tal manera que este le brindara estabilidad a toda la estructura. Utilizando el concepto anterior, se suprimió la parte superior, dejando solo la base y a esta acoplándole los soportes para las chumaceras, reforzado por unos soportes rectangulares.

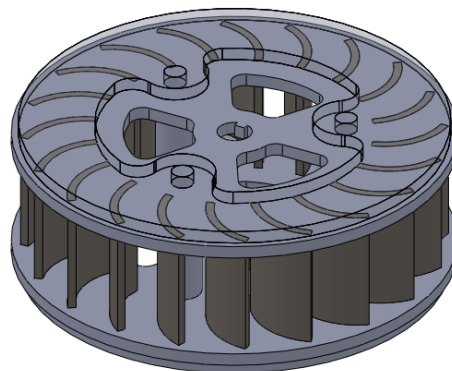
Figura 15 Diseño de chasis



### 5.3.3 Rodete:

El rodete se diseñó con base en varias premisas, utilizando como referencia el rango de caudales y presiones que se pudiera obtener en el laboratorio de Hidráulica. De este modo, se acordaron las dimensiones del diámetro del rodete y se realizaron sus respectivos cálculos para el diseño.

Figura 16 Diseño del rodete



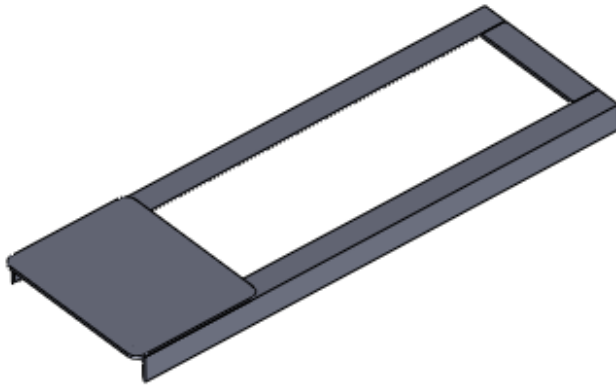
### 5.3.4 Plataforma de anclaje:

Esta fue diseñada para sostener el sistema (turbina – motor eléctrico). Dado que la transmisión de energía mecánica se hace por medio de bandas, este sistema



debe permitir tensionar la banda para evitar que esta deslice, lo que incrementaría las pérdidas de energía por falta de fricción.

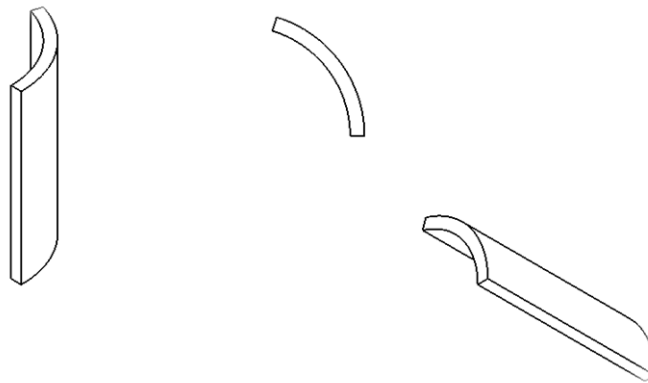
Figura 17 Plataforma de anclaje



#### 5.3.5 Álabes.

Basándose en el manual de diseño de componentes para pequeñas centrales hidroeléctricas se tomó la geometría específica para poder diseñar los álabes de tal manera que tuvieran un buen encaje en las ranuras del nuevo rodete .

Figura 18 Diseño de álabes

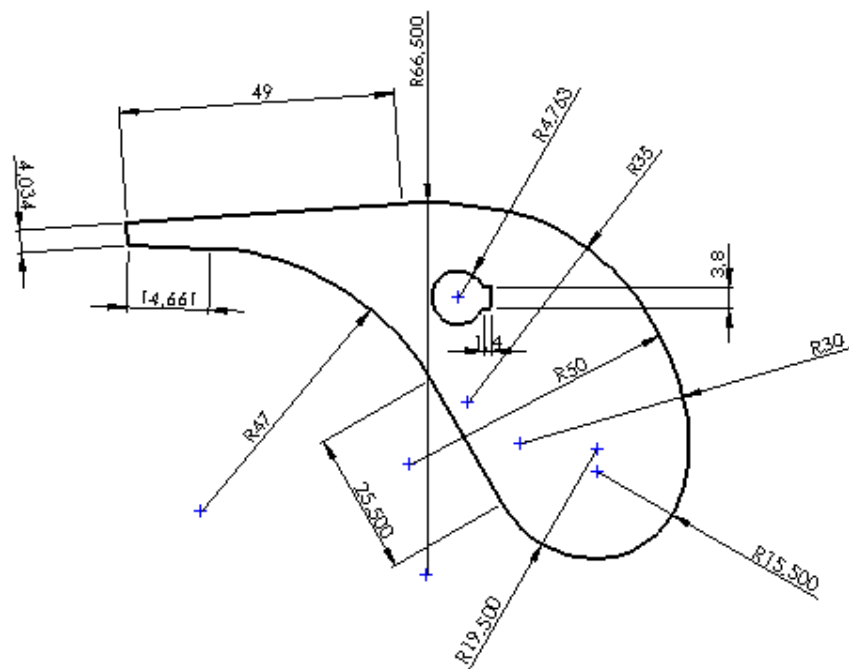


#### 5.3.6 Álabe directriz :

Tanto los álabes como el alabe directriz fueron diseñados de acuerdo a la geometría expuesta en el manual de diseño de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas. En el caso del álabe directriz se quiso utilizar un método de diseño

diferente para su posterior construcción, ya que su geometría es compleja se diseñó para que fuese cortado de una sola lámina de policarbonato (PC) en 12 láminas para luego adherirlas entre si y formar una sola pieza.

Figura 19 Diseño álabe directriz



## 6 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO DE LA TURBINA



Durante el proyecto se realizó un análisis de la turbina Michel Banki construida en el proyecto anterior, teniendo como resultado varios cambios. Se quiso mejorar tanto el prototipo, que se construyó una nueva turbina teniendo en cuenta todos los aspectos a mejorar del prototipo anterior. Con la intención de disminuir el tamaño se adecuaron todas las mejoras a un tamaño de rodete más pequeño, el cual pasó de tener un diámetro 200mm a 150 mm, lo cual implicó una disminución de tamaño y peso considerable del prototipo en general. A continuación, se mostrarán en detalle las mejoras realizadas.

### 6.1 TORNILLOS

Mientras se desensamblaba la turbina se pudo notar que los tornillos presentaban oxidación ya que no poseían tratamiento anticorrosión, lo cual se corrigió fácilmente cambiándolos por otros con un tratamiento electrolítico anticorrosivo.

Foto tornillos nuevos.

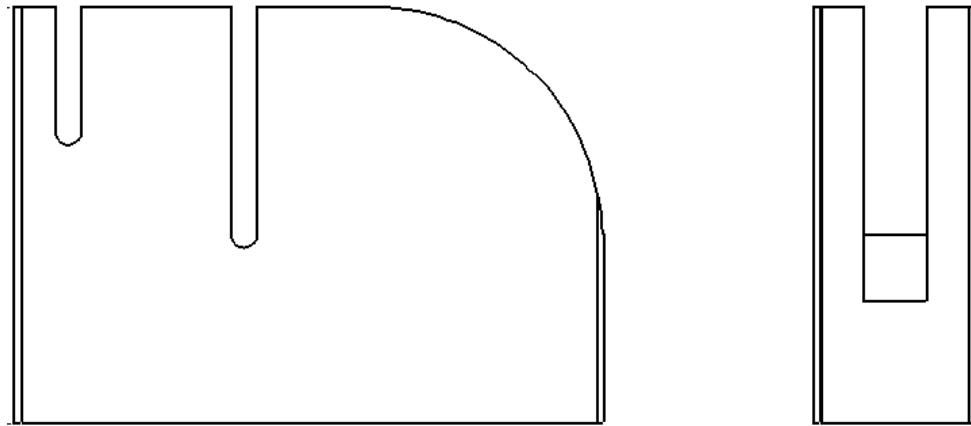
Figura 20 Cambio por tornillos inoxidables de para toda la turbina

Antes	Después
	

## 6.2 GEOMETRÍA DE LA CARCASA

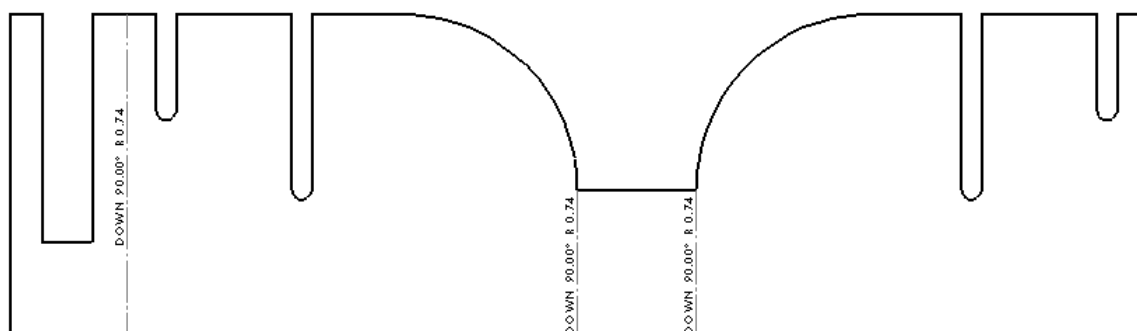
Un aspecto importante en el cual se utilizaron varias premisas acerca de este tema, como lo fue la disposición geométrica de la carcasa, ya que complicaba el ensamble de los diferentes componentes, como era el caso del sub ensamble (inyector, alabe directriz y eje del alabe directriz). Esto necesitaba un alto grado de habilidad manual, por esta razón se rediseñó la carcasa con relación al diámetro del rodete, teniendo estas nuevas dimensiones: altura = 220 mm, largo=313.08mm y ancho=86.35mm.

Figura 21 Geometría de la Carcasa.





Además de reducir su tamaño se construyó el 80% de la carcasa a partir de una sola lamina HR de calibre 1.8mm cortada con láser y 3 dobleces de 90, disminuyendo así, el tiempo de fabricación y la cantidad de soldadura requería para obtener un buen sellado

Figura 22 Desarrollo para la carcasa



En la nueva carcasa también se cambiaron la disposición de los agujeros que dan acceso tanto al eje del rodete como al eje del alabe directriz ya que pasaron de estar abiertos en la pare inferior a estar abiertos en la parte superior, dado que también se le hicieron mejoras al chasis que necesitaban el acceso por la parte superior.

Figura 23 Mejora de la Carcasa.

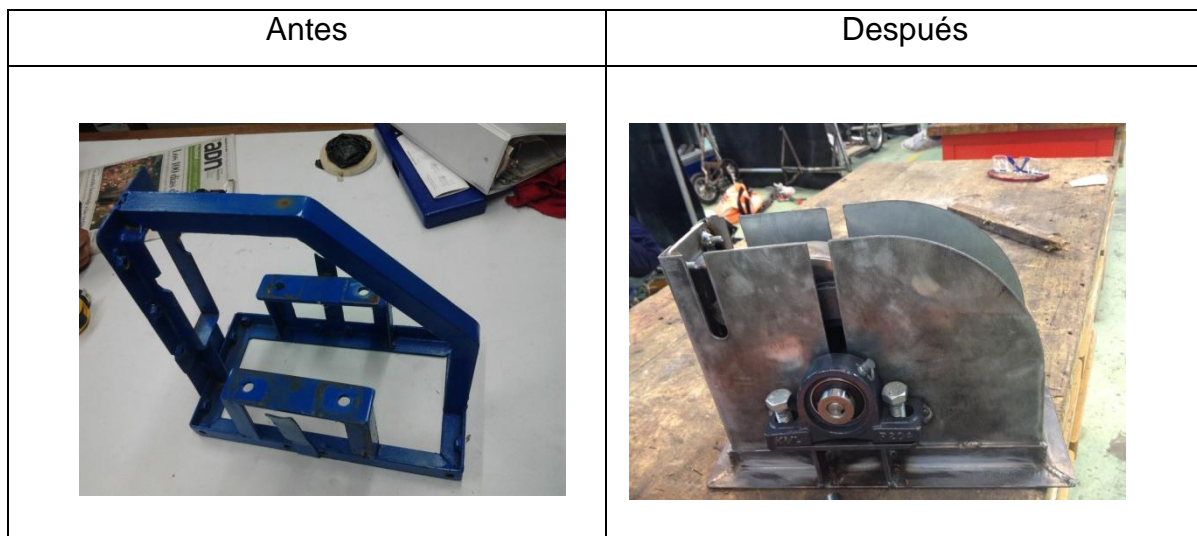
Antes	Después
	

### 6.3 UBICACIÓN DE LOS RODAMIENTOS O CHUMACERAS.

Uno de los problemas más evidentes en el diseño anterior era el hecho de que los rodamientos tenían contacto directo con el agua haciendo que siempre estuvieran expuestas a condiciones de humedad y corrosión, creando problemas a futuro ya

que estos podrían generarle una fuerza de fricción adicional por la oxidación al rodete, disminuyendo su eficiencia. El otro aspecto se trata de la complejidad para realizar un mantenimiento preventivo y de igual forma un mantenimiento correctivo en ambos casos se debía retirar la carcasa para hacer una inspección visual y después de esto aplicar las acciones necesarias de mantenimiento, al cambiar el lugar de los rodamientos, estos siempre quedan expuestos para ser vistos y poderles hacer su respectivo mantenimiento, lejos del flujo de agua y de la humedad.

Figura 24 Cambio de ubicación de Rodamientos



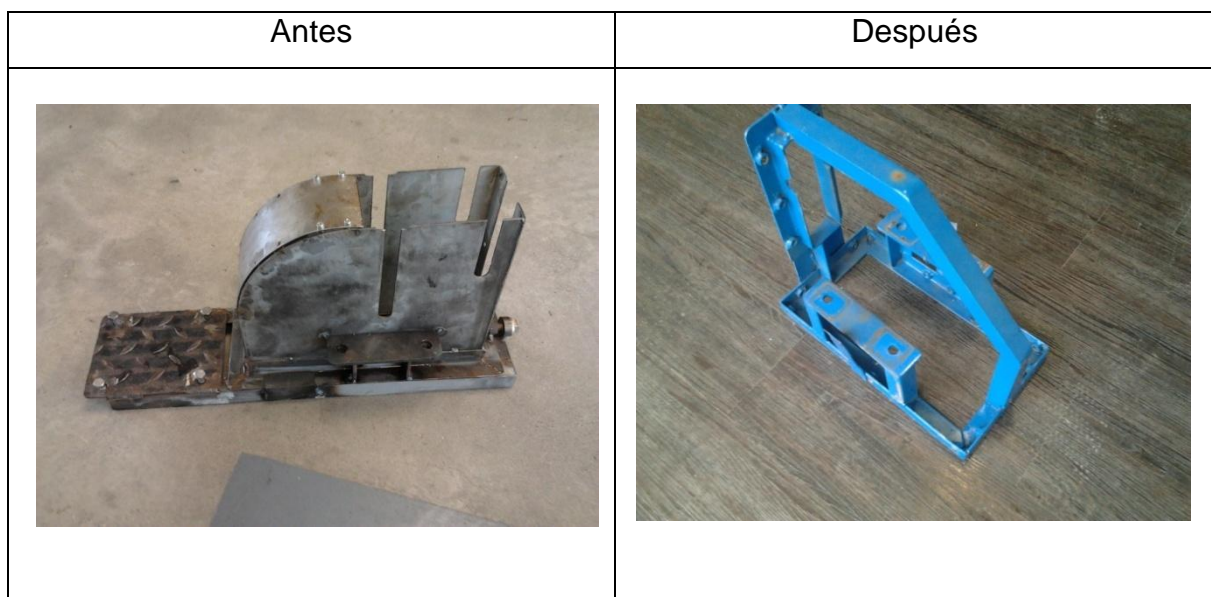
#### 6.4 CAMBIO DE CHASIS.

Para mantener los rodamientos lejos del contacto con el agua, se debió cambiar sus bases, lo cual hizo surgir la idea de poner el chasis por fuera de la carcasa haciéndolo aún más sencillo de construir y brindándole a la carcasa mayor estabilidad, lo cual fue beneficioso ya que se le pudo sujetar los apoyos para el eje del álabe directriz y reducir la cantidad de material con el que antes se construyó el chasis.

Para la construcción del chasis se usó perfil en L de 1 in, el cual se cortó a 45 grados para formar un marco, este se unió por medio de soldadura a la carcasa

para así formar una estructura firme. Luego de esto se cortaron dos láminas calibre 3/16 HR con un par de agujeros y las mismas dimensiones de la base para las chumaceras y crear una superficie en donde apoyarlas. Estas láminas se alinearon instalando el eje y luego midiendo cuál era la altura correcta y de tal forma que el eje quedara alineado. Una vez ubicadas las láminas estas se soldaron y reforzaron con un par de soportes de platina en el mismo calibre, creando un chasis, el cual se estabiliza con la ayuda de la carcasa.

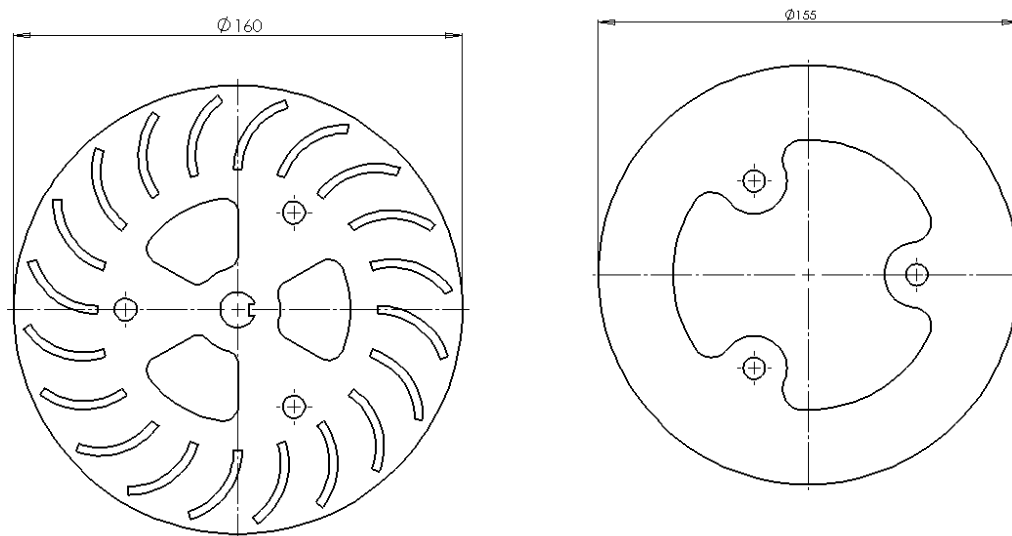
Figura 25 Cambio de chasis.



## 6.5 CAMBIO DEL DIÁMETRO DEL RODETE.

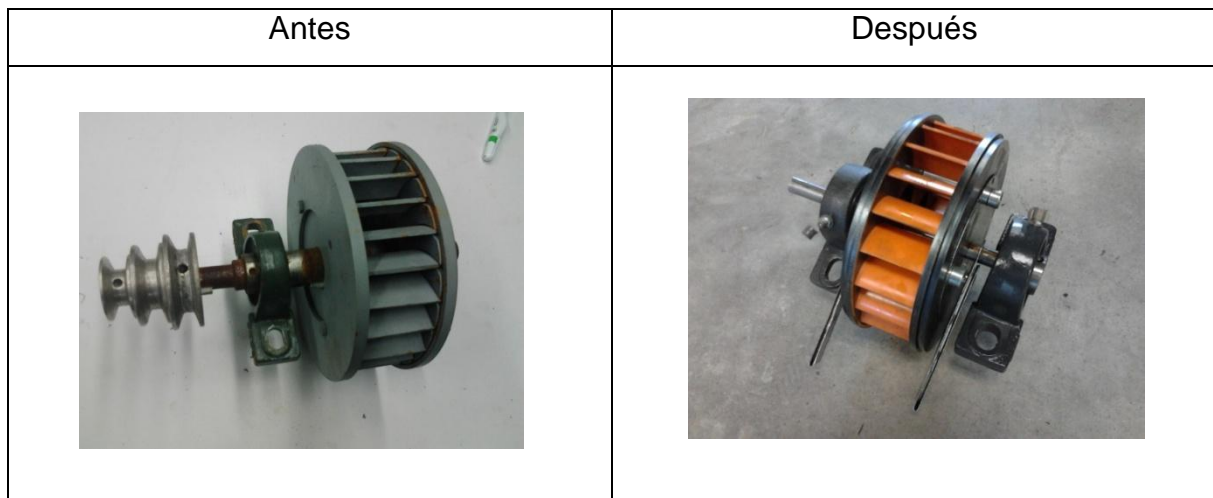
Al ser el rodete la pieza de la turbina que recibe el caudal necesario e influye en las demás dimensiones de la turbina se decidió reducir por efectos de capacidad de bombeo por parte del laboratorio de hidráulica y poder así realizar pruebas satisfactorias y en donde el caudal sea suficiente para llegar al máximo desempeño posible.

Figura 26 Dimensión del Rodete



Al cambiar el rodete se debió construir uno nuevo y para esto se utilizó un programa CAD para recrear un croquis en 2d el cual se guardó en un archivo (.dxf) para posterior mente ser cortado en láser. Para los ensayos se usaron alabes en PVC.

Figura 27 Cambio diámetro del rodete

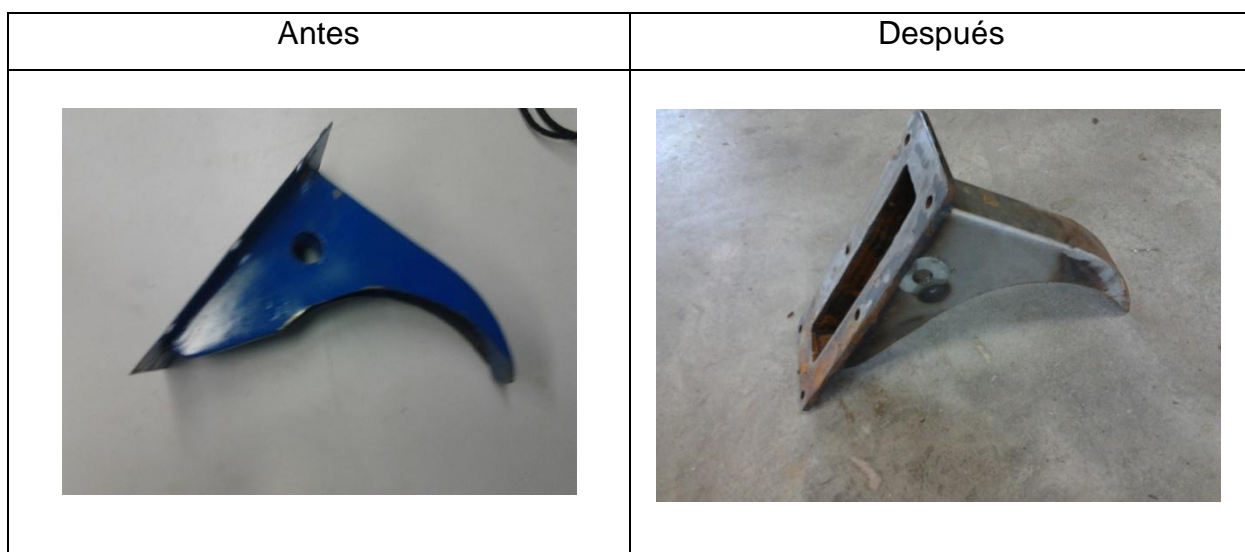




## 6.6 DIMENSIONES DEL INYECTOR.

Cuando se decidió cambiar el tamaño del rodete también se debió alterar el tamaño del inyector el cual se encuentra estandarizado y depende del diámetro del rodete. Una vez que conocidas las dimensiones se procedió a generar un croquis en 2D por medio de un programa CAD, este se guardó en un archivo .dxf Y posteriormente se cortó con láser en una lámina HR obteniendo una figura plana. Con la ayuda de una dobladora se hicieron los pliegues necesarios para crear el inyector, seguido de esto se hizo necesario darle forma manualmente a las curvaturas por medio de un martillo de cabeza plana. El paso que da como terminado la construcción del inyector, consistió en soldar (TIG) las aristas comunes para cerrar el componente.

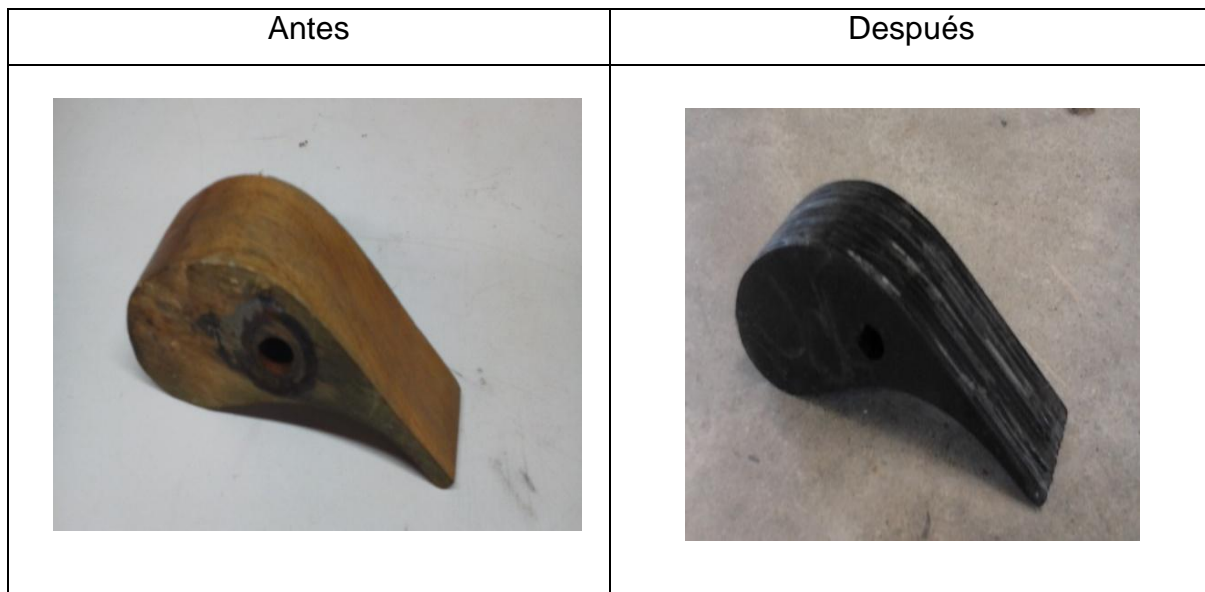
Figura 28 Mejoras realizadas en las Dimensiones del inyector



## 6.7 TAMANO DEL ÁLABE DIRECTRIZ Y CAMBIO DE MATERIAL

Al ser una pieza con una geometría compleja se decidió utilizar 11 piezas idénticas con el fin de alcanzar el espesor deseado de 30 mm, también se cambió el material usando polietileno, cortándolo en láser y con las dimensiones acorde con el tamaño de rodete.

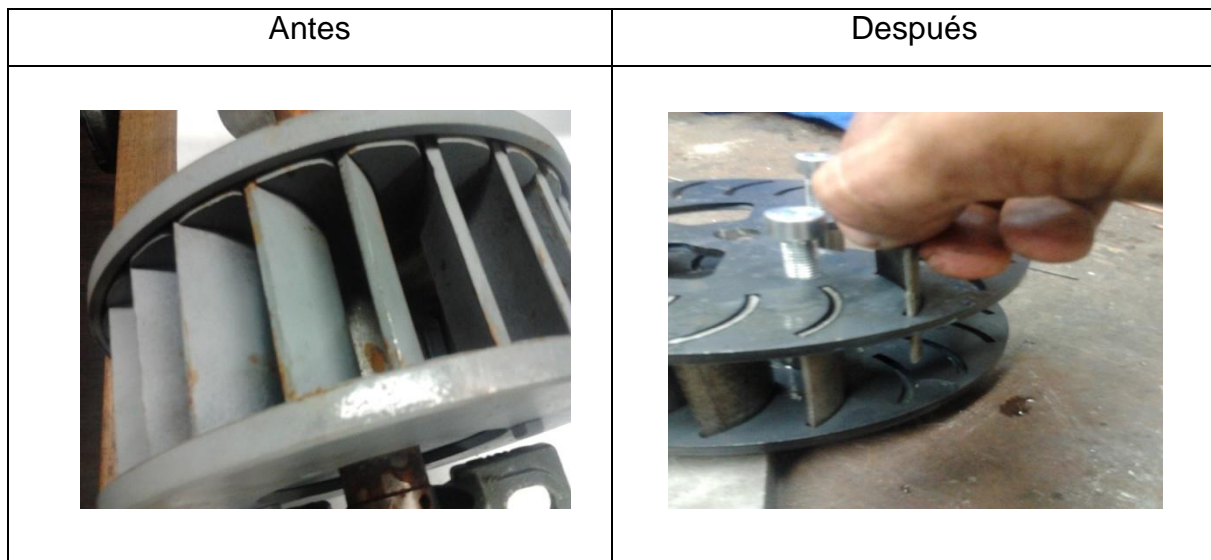
Figura 29 Cambio de material y dimensiones del álabe directriz



#### 6.8 CAMBIO DE MATERIAL DE LOS ALABES DEL RODETE Y MEJORA DEL ENSAMBLE DE LOS ALABES

Los álabes siempre se han propuesto en acero, pero para las pruebas de la turbina se utilizó tubería de PVC, lo que facilita el reemplazo de uno de ellos en caso de ser necesario. Además, la forma en cómo los álabes están dispuestos facilita la manera en cómo se ensamblan, ya que se cuenta con una tapa la cual está sujeta por 3 tornillos que al quitarla da acceso completo a todos los álabes. Los álabes deben ingresarse uno a uno, haciendo coincidir la ranura de entrada con la segunda ranura y una vez puesta en su lugar la tapa asegura los álabes para evitar movimientos indeseados.

Figura 30 Mejora en el ensamble de los álabes



#### 6.9 DISMINUCIÓN DIÁMETRO DE EJE DEL RODETE.

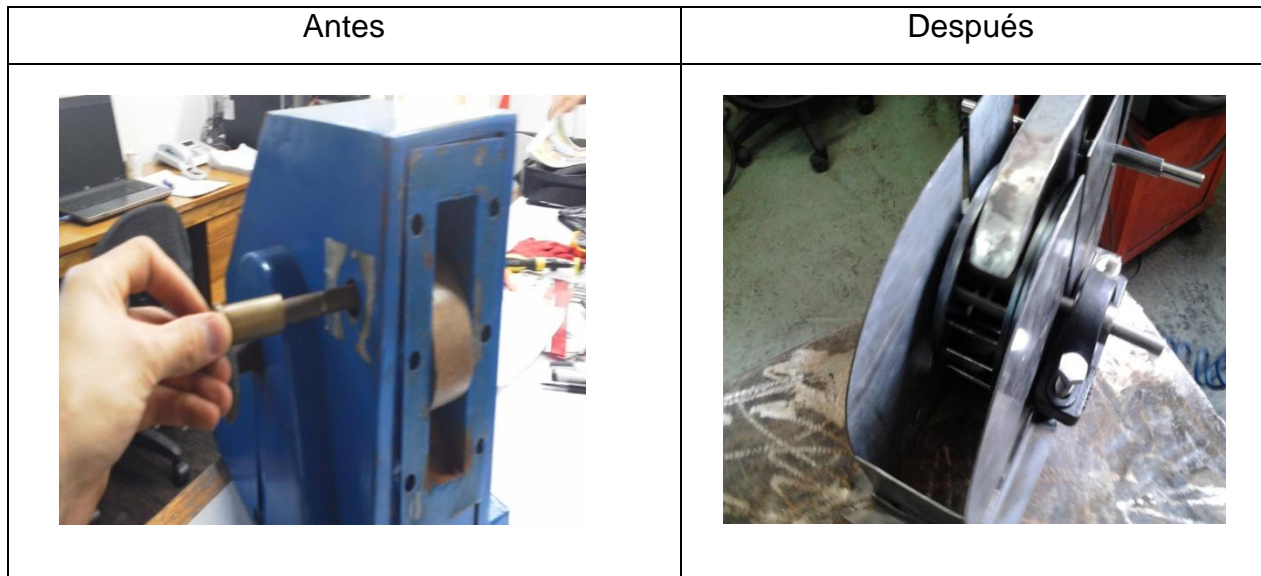
El diámetro del eje del rodetes se disminuyó reduciendo peso, ya que el eje que se usó anteriormente tenía un diámetro de 1 ¼", con una reducción diámetro para acoplar en unas chumaceras con diámetro de 1 pul y otra reducción para entrar en la polea. Toda esta variación de diámetros se quiso mejorar y remplazarlo con un eje de sección uniforme de ½", el cual es económico y de medida comercial.

#### 6.10 FORMA DE ENSAMBLAJE EJE ÁLABE DIRECTRIZ, ÁLABE DIRECTRIZ E INYECTOR

La forma como antiguamente se ensamblaban estos componentes era muy tediosa y necesitaba de una gran habilidad para su ensamble. Con estos antecedentes se decidió cambiar esto para que pueda ser ensamblado por personal con una mínima instrucción y esto se consiguió agregando una ranura a la carcasa de la turbina brindando así la posibilidad de ser ensamblado fácilmente ya que se pre ensambla alineando el agujero que se encuentra en el inyector con el agujero presente en el álabe directriz. Por último, se atraviesan ambos elementos con el eje dispuesto para esto. Teniendo ya todo ensamblado se

ingresa el conjunto de componentes por la ranura hasta el lugar donde se encuentran los agujeros para sujetar el sistema del inyector con el acople de la entrada de agua.

Figura 31 Mejora forma de ensamblaje sistema inyector.



#### 6.11 TOPE EN EL INYECTOR PARA EL ALABE DIRECTRIZ

Este tope para el álabe directriz es necesario ya que impide que este impacte los álabes del rotor mientras está en funcionamiento, al ponerlo en la posición de máxima apertura. La mejora es sencilla pues solo basta con identificar cual es la posición del alabe directriz de máxima apertura, en otras palabras la posición más cercana que se puede alcanzar antes de tocar los álabes del rotor y en esta posición hacerle un hueco pasante que más tarde se atraviesa con un tornillo común y asegurándolo con una tuerca del otro extremo.

Figura 32 Mejora tope en el alabe directriz.

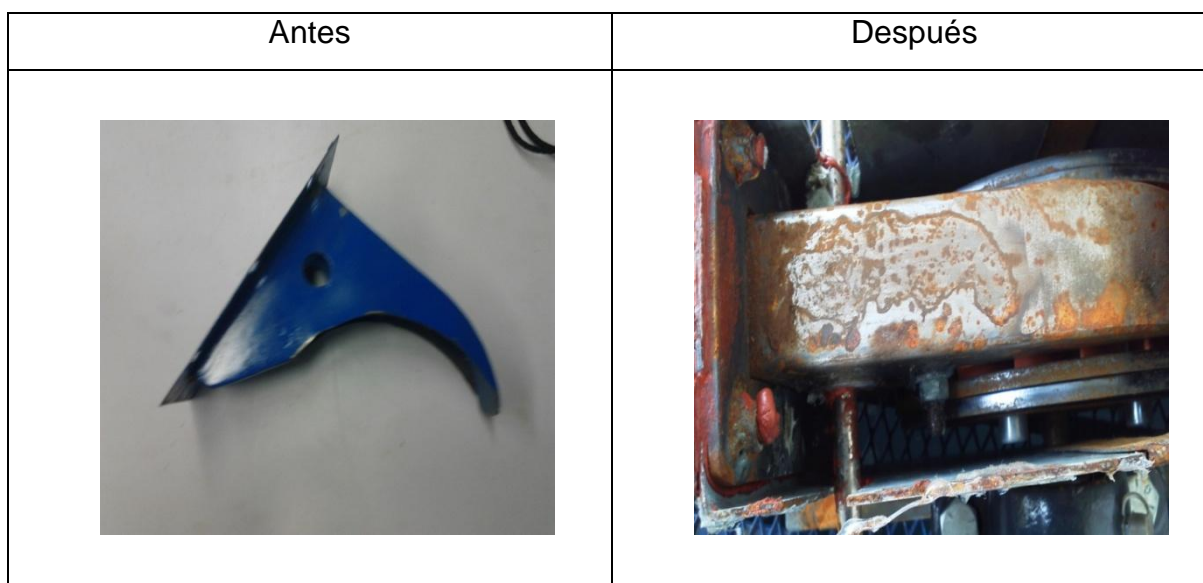
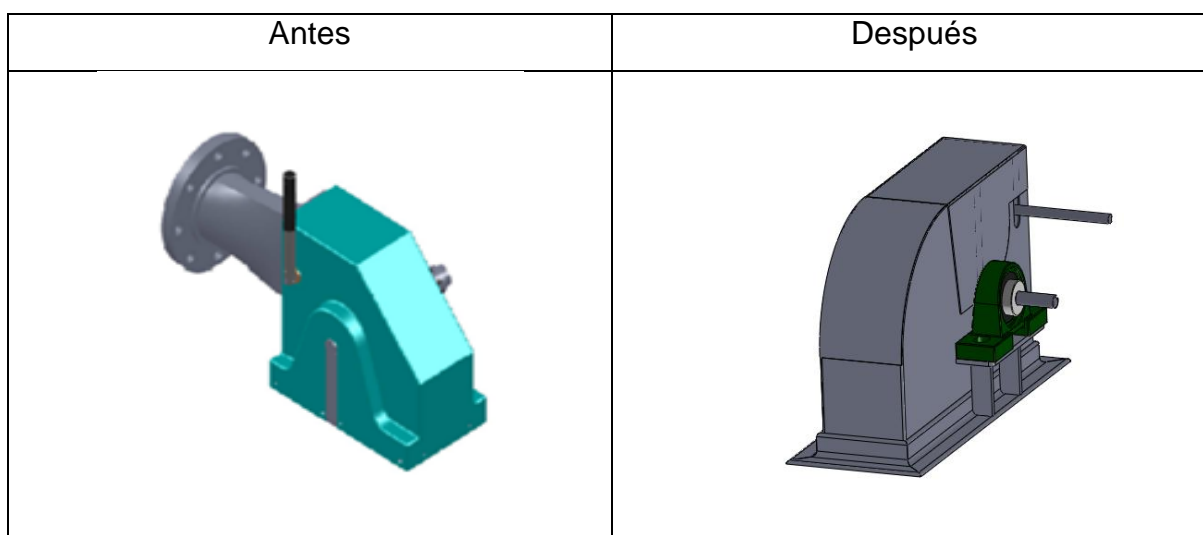


Figura 33 Vista de la turbina después de las mejoras.



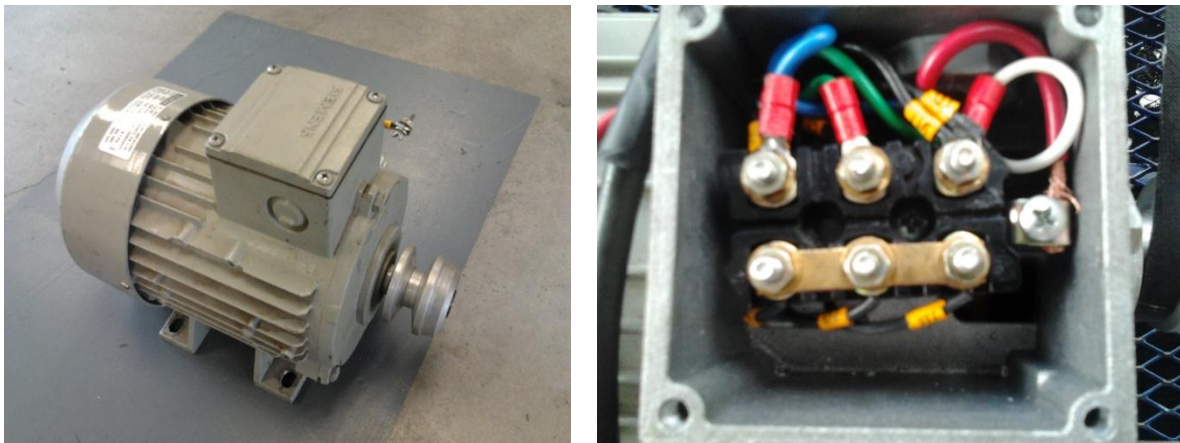
## 7 SELECCIÓN UN GENERADOR ELÉCTRICO PARA EL SISTEMA PROTOTIPO DE PICO-GENERACIÓN

Para la selección de un generador apropiado para esta turbina se tuvo en cuenta cuanta potencia se puede generar. En este caso la turbina genera alrededor de 1HP por esta razón el generador debe ser equivalente o de más capacidad para no causar daños internos al generador por sobrecarga.

Existe la posibilidad de usar motores de inducción como generadores acondicionándoles una serie de capacitores que excitan las bobinas, para así generar energía eléctrica. Antes de tomar una decisión, se consideraron una serie de aspectos como son: la potencia eléctrica que pueden producir, el voltaje (que para este tamaño puede variar de 110V a 220V) y el tipo de protección con la que cuenta el motor o generador.

Se decide usar un motor como generador por la facilidad de consecución y bajo costo, ya que la universidad posee este tipo de motores y los capacitores necesarios para que el motor funcione como generador.

Figura 34 Motor eléctrico usado como generador



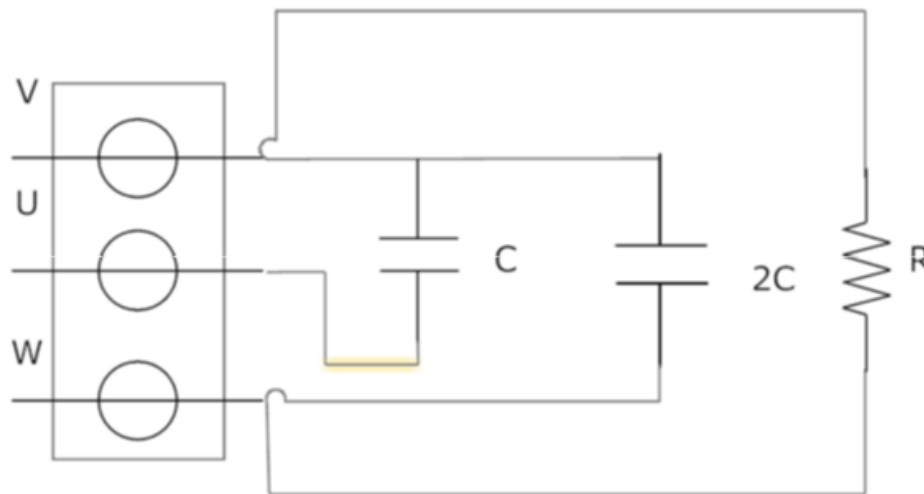
En la Figura 34 se muestra el motor que fue usado como generador.



## 7.1 CALCULO DE LA CAPACITANCIA PARA LA EXITACION

Para que el motor de inducción pueda generar energía eléctrica es necesario conectar una serie de capacitores de excitación. Existe una configuración la cual se muestra en la Figura 35 logrando una generación monofásica a 220V.

Figura 35 Esquema de conexión capacitancia



Para determinar el valor de la capacitancia necesaria se deben tener en cuenta las características técnicas del motor, las cuales se muestran a continuación.

Tabla 1 Datos técnicos del motor utilizado como generador

<i>MOTOR SIEMENS /TRIFASICO/ 4 POLOS/1660 RPM/60Hz</i>
<i>Potencia: 1 HP</i>
<i>Voltaje: 220V</i>
<i>Corriente de plena carga: 3.6A</i>
<i>Tipo de protección: IP55</i>

Se calcula la capacitancia necesaria para generar los reactivos necesarios para la generación (Smith, 2008):

Se calcula la potencia total aparente:

$$\Sigma S_{NO\ carga} = \sqrt{3} \times V_{linea} \times I_{linea} = \sqrt{3} \times 220 \times 3,6 = 1371,78\ VAR$$

Como la potencia total aparente sin carga es igual a la potencia reactiva tenemos:

$$\Sigma Q = \Sigma S_{NO\ carga} = 1371,78 \text{ VAR}$$

Luego, se calcula la potencia reactiva por fase

$$Q_{Fase} = \frac{Q}{3} = \frac{1371,78424}{3} = 457,26$$

Para capacitores conectados en delta:

$$V_{fase} = V_{linea} = 220 \text{ V}$$

Se calcula la corriente de la fase:

$$I_{fase} = \frac{Q_{fase}}{V_{fase}} = \frac{457,2614132}{220} = 2,07 \text{ A}$$

Luego se calcula el valor de la capacitancia total:

$$C = \frac{I}{2\pi f V} = \frac{2,0784609}{2\pi \times 60 \times 220} = 25.06 \mu F$$

## 7.2 CÁLCULOS DE TRANSMISIÓN

Para los cálculos de transmisión se usa una fórmula muy simple que nos indica cual es la relación de transmisión la cual para este caso se debe pasar de 750 RPM por parte de la turbina y aumentarlas a 1660 del motor más un 10% adicional por tratarse de un motor de inducción que se usó como generador para el sistema, dándonos como resultad una velocidad de rotación de 1826 RPM

$$D \cdot n_1 = d \cdot n_2$$

D= dímetro polea mayor

$n_1$ =numero de RPM polea mayor

d= diámetro polea menor

$n_2$ = numero RPM polea menor



Haciendo una suposición de que el diámetro mayor es 1 para poder así hallar la relación entre los diámetros de las 2 poleas, y más tarde usar los diámetros que se puedan encontrarse comercialmente.

$$\frac{D * n_1}{n_2} = d$$

$$\frac{1 * 677}{1826} = d$$

$$d=0.37$$

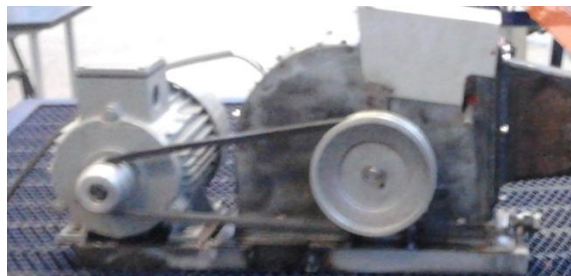
Usando esos diámetros hipotéticos podemos hallar la relación entre los diámetros de las poleas.

$$\frac{1}{0,37}=2.7$$

Esto lo que quiere decir es que la relación de diámetros entre ambas poleas es de 2.7:1

Las poleas que se usaron realmente tienen una relación de 2.5:1 por efectos de que son comerciales y tienen un muy bajo precio. Las dimensiones de los diámetros que finalmente se usaron fueron 2" para el diámetro menor y 5" para el diámetro mayor.

Figura 36 Sistema de transmisión



La banda que se uso fue tipo B 30 ya que las poleas utilizadas requieren este tipo de banda.

## 8 MONTAJES PARA PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA PROTOTIPO DE PICO-GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA.

Después de construir la turbina se debió simular las condiciones de caudal y presión para las cuales fue diseñada, debido a eso se tuvo que hacer una acople al sistema de tuberías del laboratorio de hidráulica. Para esto fue necesario un acople macho roscado de 3", con un una reducción de 3" a 2" al cual se le unió un tramo de tubería 2" de aproximadamente 30 centímetros y todo esto en PVC. Por efecto de la manera que fue facilitado por parte de laboratorio para el montaje se debió unir un tramo de aproximadamente 15 centímetros de tubería modificada calentado el tubo de plástico e insertándolo en el tramo metálico, esto fue necesario ya que el diámetro inicial de 2" era demasiado grande para que la manguera de caucho reforzada con lona, además se debió calentar la manguera para poderla insertar en la tubería metálica todo este proceso dio como resultado un pequeño montaje el cual se puede evidenciar en las siguientes imágenes.

Figura 37 Acople para la manguera en el anillo hidráulico



En la Figura 38 se puede apreciar el acople que fue necesario fabricar para utilizar el sistema hidráulico del laboratorio donde se encuentra el acople roscado macho, la reducción de 3 pul a 2 pul, el tramo de aproximadamente 30 cm de tubería PVC, el tramo de tubería metálica modificado y por último la manguera de 2 pul de color amarillo. En la imagen se puede observar el sistema completamente conectado.

Figura 38 Sistema de pico generación acoplado al anillo hidráulico



Por otra parte se debió realizar una conexión de un circuito de capacitores junto con un panel de bombillos que hacían las veces de resistencia, este tuvo que ser modificado ya que pertenecía a un experimento antiguo y se debía cambiar sus conexiones para poder ser utilizado bajo las condiciones de voltaje que nos brindaba la turbina, ya que el motor eléctrico dispuesto genera corriente eléctrica a un voltaje de 220V o más los bombillos tuvieron que ser reconectados en 4 paralelos de series de 2 bombillos para así crear un consumo de 200W y 220V por serie.

Figura 39 Panel de bombillos



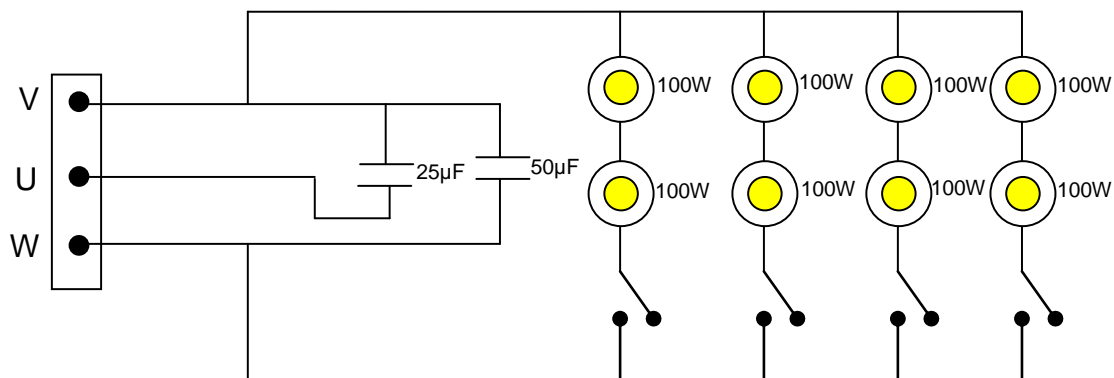
En la Figura 39 se puede observar el panel de bombillos

El panel cuenta con 10 bombillos los cuales fueron conectados por pares y a su vez en paralelo con el resto de los pares utilizando un interruptor entre cada pareja que permite encender una serie a la vez como podemos ver en la secuencia.

Figura 40 Etapas de las pruebas



Figura 41 Esquema del montaje para las pruebas



El esquema para el montaje de la turbina en el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT, fue definido de la siguiente manera: La turbina fue instalada sobre una plataforma enmallada de manera que el agua que sale de la turbina cayera al vertedero por acción de la gravedad. El agua es recirculada por un sistema de bombeo.

Una vez definido el punto de ubicación de la turbina, se procedió a diseñar el montaje conformado por una manguera y algunos otros acoples antes mencionados.

En el laboratorio de hidráulica se tiene un sistema de tuberías que consiste en un anillo en el cual se recircula el agua y al cual se acoplan los distintos montajes. El anillo en tubería de 8 pulgadas de diámetro lleva el fluido hasta la terminal seleccionada, ahí se conecta una reducción de 8" a 3" vertical y se coloca una unión roscada de 3" para unir con una reducción de 3" a 2". Luego este se conecta con un tramo de tubo de 30cm aprox y a su vez con un tramo de tubería metálica reformado de 2", al cual se conecta una manguera de 2". En el otro extremo se encuentra la entrada a la turbina, en ese punto la turbina cuenta con un manómetro.

Luego de hacer el montaje hidráulico de suministro se realizan las respectivas conexiones eléctricas, como fue la conexión desde los tres polos del motor hasta llegar a los capacitores, de los cuales salen dos cables que alimentan el panel con los 10 bombillos. En este punto, las conexiones hidráulicas y eléctricas están listas lo cual permite accionar el sistema.

#### 8.1.1 Procedimiento para pruebas experimentales

Las pruebas consistieron en encender el sistema de bombas del laboratorio y llevarlas hasta 3000 rpm esto generaba un caudal máximo de 16,3LPS. Teniendo este primer dato se abrió la válvula de suministro para el sistema, dándole paso al flujo de agua a través de la turbina, generando movimiento en el sistema prototipo



de picogeneración hidroeléctrica. En este momento se empieza la recolección de datos los cuales son: presión en la entrada de la turbina, caudal (tomado en el anillo por medio de un flujómetro digital), velocidad de giro de la turbina y el motor como generador (tomadas con un tacómetro digital láser), temperatura de la carcasa del motor y del sistema de poleas (termómetro digital laser), voltaje, corriente y frecuencia de la corriente eléctrica (tomados con un multímetro digital). En la primera parte no se conectan los capacitores, por lo cual no hay carga eléctrica y tampoco se miden las variables eléctricas. Luego se conectan los capacitores y se varía secuencialmente la carga.

Cada una de estas mediciones se realiza para cada ciclo, el cual era determinado por la variación de caudal (cercana a 1LPS), que se hacía cerrando parcialmente la válvula de suministro del sistema. Para cada caudal, se enciende primero una serie de 2 bombillos, luego otra, y así hasta llegar a las 4 series de bombillos. Una vez encendidos los 8 bombillos se apagan todos y se vuelve a empezar, con los siguientes pasos:

- a) Se fija el caudal y se espera a que este se estabilice.
- b) Se abre el contacto para que evaluar el comportamiento sin el efecto de los capacitores.
- c) Se cierra el contacto para que los capacitores actúen, se toman todos los datos.
- d) Se enciende la primera serie de un par de bombillos como se muestra en la Figura 42, y se toman todos los datos.

Figura 42 serie de 2 bombillos



- e) Se enciende la segunda serie de un par de bombillos como se muestra en la Figura 43, y se toman todos los datos.

Figura 43 serie de 4 bombillos



- f) Se enciende la tercera serie de un par de bombillos como se muestra en la Figura 44Figura 43, y se toman todos los datos.

Figura 44 serie de 6 bombillos



- g) Se enciende la cuarta serie de un par de bombillos como se muestra en la Figura 45, y se toman todos los datos.

Figura 45 serie de 8 bombillos

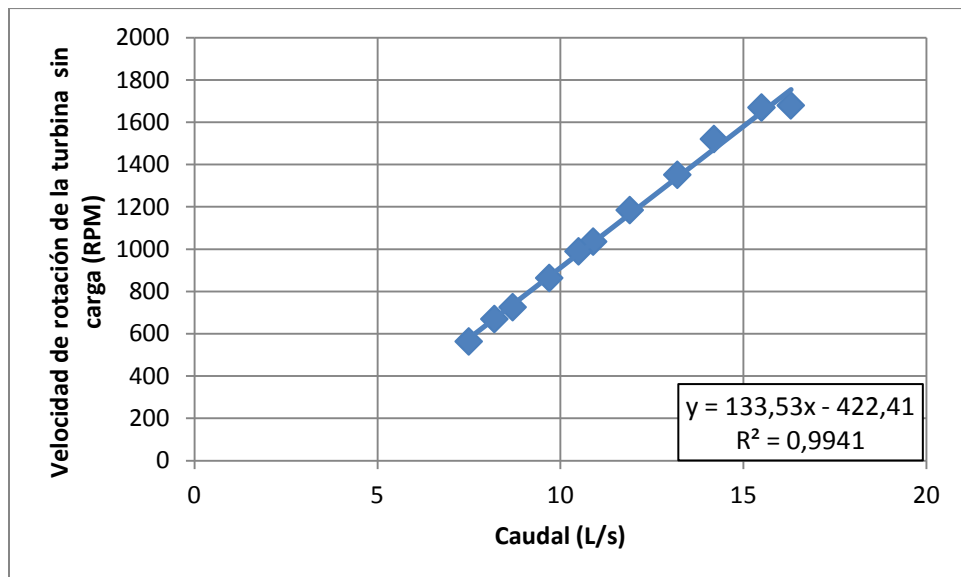


- h) Se apagan todos los bombillos y se varía el caudal. Luego se repiten los paso de b) a g).

## 9 RESULTADOS PRUEBAS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA PROTOTIPO DE PICOGENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

En la Figura 46, se presenta el comportamiento de la velocidad de rotación de la turbina sin carga con respecto al caudal. Se puede observar un comportamiento lineal. Para el caudal de diseño de la turbina que es 12LPS la velocidad de rotación sin carga es cercana a 1200 RPM. Se observa que la turbina necesita un caudal mínimo para comenzar su movimiento.

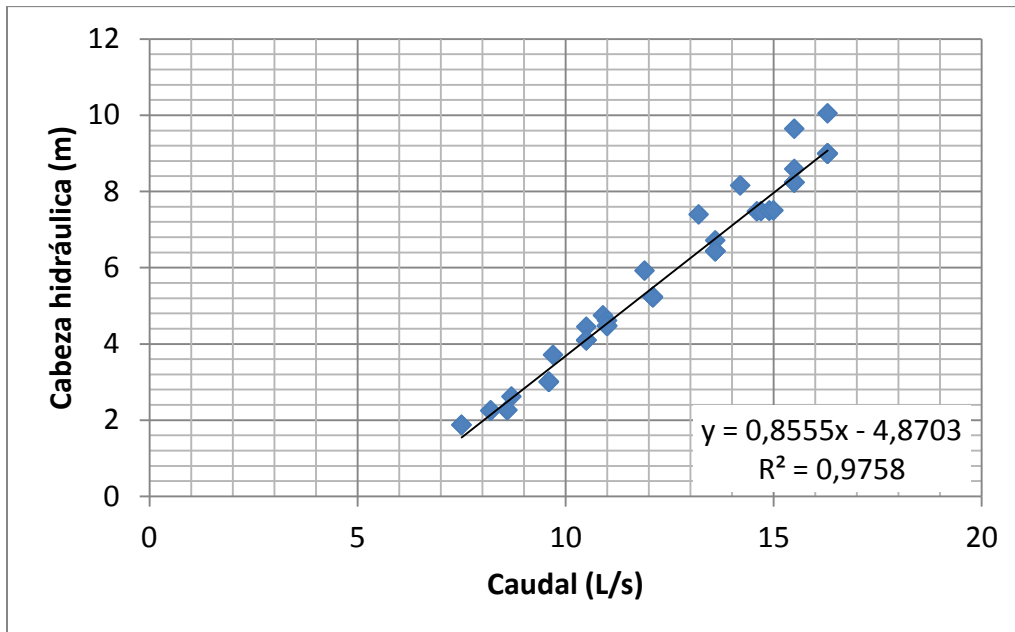
Figura 46 Velocidad de rotación sin carga vs caudal



La Figura 46 muestra un comportamiento lineal ya que al disminuir la cabeza hidráulica disminuye el caudal.



Figura 47 Cabeza hidráulica vs caudal



La Figura 47 muestra el comportamiento del voltaje generado con respecto a la corriente para diferentes caudales. El voltaje no se mantiene constante por lo que el comportamiento del sistema difiere del de una fuente de voltaje ideal. La caída de voltaje es más pronunciada a medida que el caudal disminuye.

Figura 48 Voltaje vs Corriente (capacitancia 25uF)

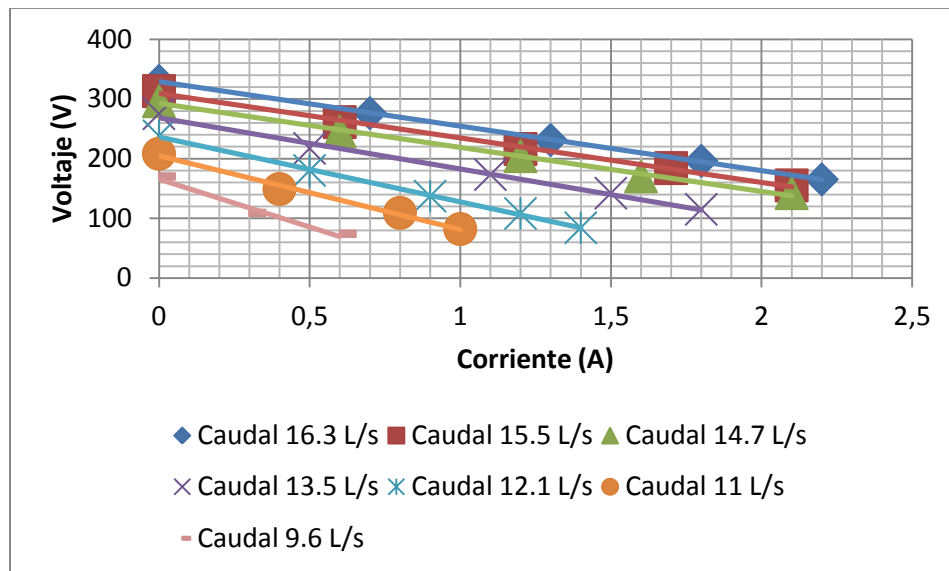
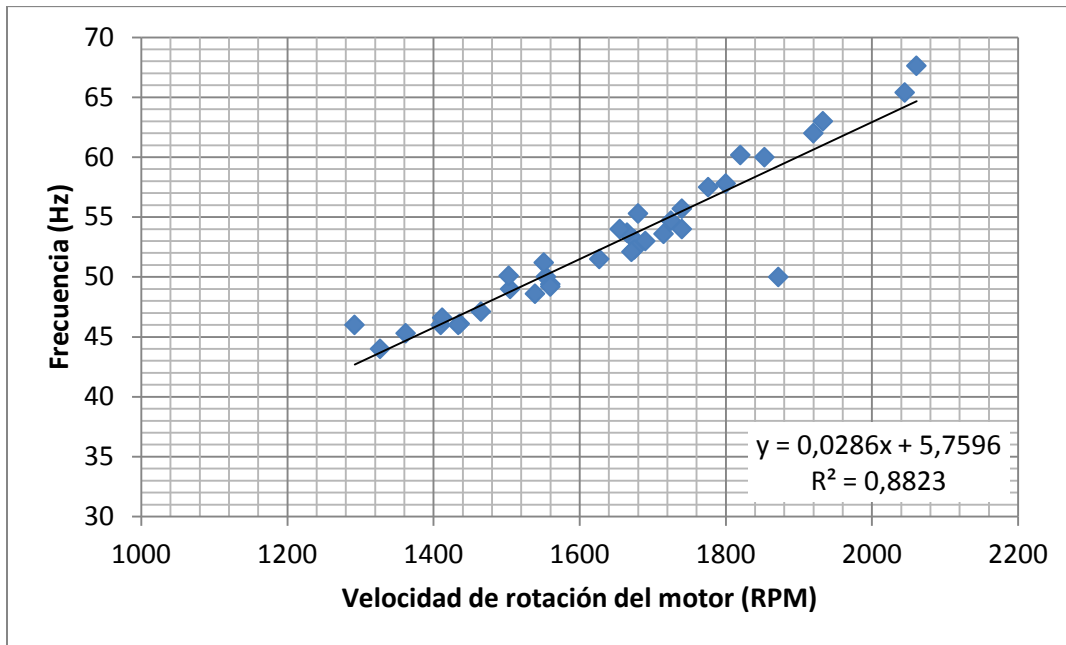
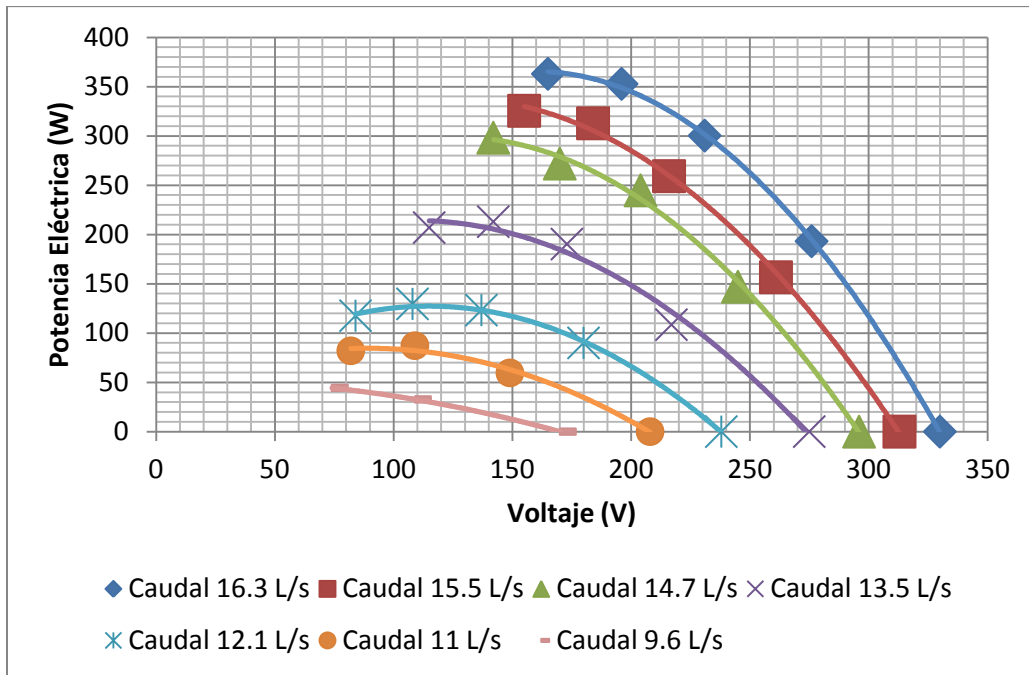


Figura 49 Frecuencia vs Velocidad de rotación (capacitancia 25uF)



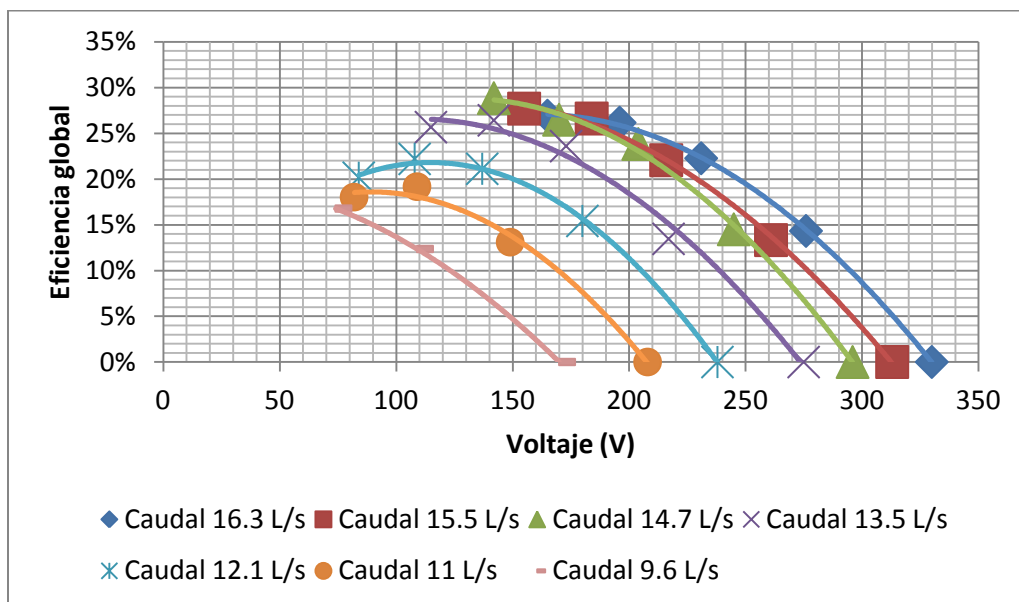
En la Figura 49 se puede apreciar la relación voltaje vs potencia eléctrica la cual donde el valor más alto de potencia eléctrica fue 352,8 W a 196V. La gráfica tiene un comportamiento parabólico la cual hubiese podido mostrar un declive de la potencia eléctrica pero no se pudo completar al tener un aumento de temperatura en el motor impidiéndonos aumentar la resistencia a 10 bombillos

Figura 50 Potencia vs voltaje (capacitancia 25uF)



En la Figura 50 se puede observar un comportamiento parabólico en donde la eficiencia global del sistema es de aproximadamente el 30%, y un voltaje máximo de aproximadamente 340V. El punto de máxima eficiencia se presenta cuando el caudal tiene un valor de 14,7L/s y el voltaje es 142V.

Figura 51 Eficiencia global vs voltaje (capacitancia 25uF)



En la Figura 51 se muestra el comportamiento por parte de la corriente vs frecuencia dando como resultado un desempeño lineal. Además, posteriormente se midió el tipo de onda generada por la frecuencia y dando como resultado una onda senoidal uniforme.

Figura 52 Forma de la onda generada

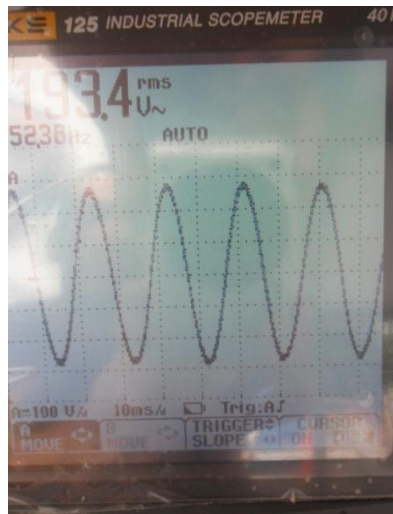
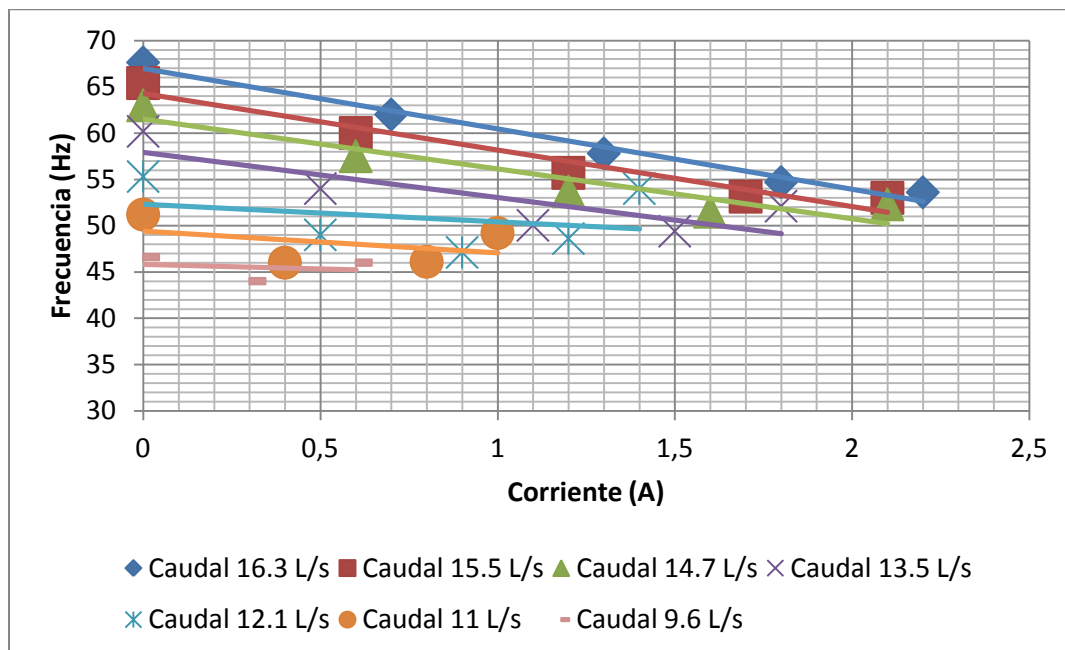


Figura 53 Frecuencia vs corriente (capacitancia 25uF)



## 10 CONCLUSIONES

- Se adecuó y evaluó en el laboratorio un sistema prototipo de picogeneración (menor a 10kW) hidroeléctrica con una turbina Michell – Banki y un motor asíncrono como generador. El prototipo de turbina tiene un rodete con 15 cm de diámetro, un caudal de diseño de 12L/s y una cabeza de 6.5m. Considerando una eficiencia del 85%, la potencia al freno esperada es de 650W. El motor utilizado como generador es de 745.7W (1hp) y requiere de una capacitancia de excitación de 25uF. La máxima potencia eléctrica efectiva obtenida del sistema prototipo de picogeneración es de 363W con un caudal de 16.3L/s y una cabeza de 9m.
- Al realizar este proyecto se obtuvieron una serie de resultados positivos ya que se pudo producir energía eléctrica de un modo limpio. En este caso se usó una fuente artificial de caudal para simular las condiciones que se puede obtener de una fuente natural y disponible en nuestro país, con bajos recursos y una inversión inicial recuperable a muy corto plazo ya que para este prototipo fue de \$350,000 sin incluir el motor o generador ni tampoco capacitores.
- Del análisis del prototipo de turbina existente se identificaron puntos de mejora como son: geometría de la carcasa, la manera como se ensambla el inyector y el álabe directriz, el material del álabe directriz y la necesidad de aislar los rodamientos de la humedad. Además, teniendo en cuenta el caudal que se puede obtener con el sistema de bombeo del laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT, se concluyó que el prototipo de turbina debería ser más pequeño. De este análisis se concluyó que resultaba pertinente la construcción de un nuevo prototipo.

- Por efectos de practicidad y facilidad de consecución se escogió un motor de inducción eléctrica, el cual se acondicionó con una serie de capacitores para operar como un generador eléctrico.
- Durante las pruebas de operación para evaluar el desempeño del sistema prototipo de pico-generación hidroeléctrico se observó el comportamiento del sistema al sufrir cambios en el caudal y variación en la corriente al prender una cantidad de bombillos. La máxima eficiencia global obtenida durante las pruebas fue de 28.83% con un caudal de 14.7 L/s y una cabeza de 7.5m. Esta eficiencia es relativamente baja y puede deberse al uso de un motor como generador en lugar de un generador eléctrico.
- Se observa que el voltaje generado por el sistema varía linealmente con la corriente, es decir, que no se mantiene para cualquier carga. La frecuencia de generación se mantiene entre 47Hz y 67 Hz, para la capacitancia utilizada que es de 25uF, lo cual es perjudicial para el sistema ya que lo ideal fuera que la frecuencia permaneciera constante.

## 11 RECOMENDACIONES.

- .continuar la investigación y desarrollando maneras más fáciles, rápidas y económicas para construir este tipo de sistemas de generación eléctrica.
- Implementar nuevos materiales amigables con el medio ambiente para la construcción de una generación de turbinas hidroeléctricas.
- Usar un generador eléctrico sincrónico en lugar de un motor eléctrico como generador.
- Hacer una turbina con carcasa transparente para estudiar mejor el flujo en el interior
- Hacer un proceso de galvanizado para evitar la corrosión
- Hacer ensayos con otros valores de capacitancia teniendo cuenta la carga eléctrica
- Realizar ensayos del desempeño mecánico de la turbina sin acoplarla al generador. Para caracterizar el comportamiento de ésta.
- Considerar el uso de otro tipo de transmisiones y de distintas relaciones de transmisión. De esta manera se pone a trabajar la turbina en un mejor punto de operación.

## 12 BIBLIOGRAFIA

CERPCH. (s.f.). *Turbinas No Convencionales*. Recuperado el Febrero de 2012, de [http://www.cerpch.unifei.edu.br/sp/michell\\_banki.php](http://www.cerpch.unifei.edu.br/sp/michell_banki.php)

Comité Ejecutivo de Desarrollo e Innovación Tecnológica. (s.f.). *CEDIT*. Recuperado el Febrero de 2012, de <http://www.cedit.misiones.gov.ar/>

Guerrero, D., & Tapias, J. D. (2011). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TURBINA MICHELL-BANKI PARA PICO GENERACIÓN EN ZONAS NO-INTERCONECTADAS*. Universidad EAFIT. Medellín: Proyecto de grado Ing. Mecánica.

Meilan, S. (n.d.). Saint Meilan, Fujian Machinery and Electric. Retrieved Mayo 2012, from <http://www.smlmotor.com>

Pelaez, J. D. (2012). *ESTUDIO DEL FUNCIONAMIENTO Y PROPUESTA DE REDISEÑO DE UN PROTOTIPO DE PICOTURBINA MICHELL-BANKI*. Universidad EAFIT. Medellín: Proyecto de grado Ing. Mecánica.

Soluciones Prácticas. (s.f.). *Soluciones prácticas*. Recuperado el Febrero de 2012, de <http://www.solucionespracticas.org.pe/>

Universidad Nacional. (s.f.). *Avances en recursos hidráulicos*. Recuperado el 2012, de [www.revista.unal.edu.co/index.php/arh/article/download/](http://www.revista.unal.edu.co/index.php/arh/article/download/)



## 13 ANEXOS